

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Par : Kadri Rabie Youcef
Kerris Djamel Djoudil

Sujet

Etude de la ventilation d'un habitacle à des fins d'homogénéisation des zones de confort

Soutenu publiquement, le 22/06/2025, devant le jury composé de :

Mme. Benahmed Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mme. Si chaïb Amel	MAB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr. Aliane Khaled	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025

REMERCIEMENT

Au terme de la réalisation de ce présent mémoire, on tiens à exprimer toute notre reconnaissance à notre promoteur : Monsieur Aliane Khaled pour son encadrement ainsi que pour son soutien technique qui nous a encouragé à réaliser ce modeste travail.

Nous remercions les honorables membres du jury Mme. Benahmed Lamia et Mme. Si Chaib Amel qui nous ont font l'honneur de corriger et juger notre travail.

On remercie également tous les professeurs du département de génie mécanique.

DEDICACE

Je voudrais d'abord dédier ce travail à mes chère parents qui on été là jour et nuit depuis le premier jour, mes remerciements ne sauraient combler tout ce que vous avez fait pour moi, ainsi que mon chère et unique frère Ibrahim , qui m'a encouragé à faire énergétique et à toujours donner le meilleur de moi-même, Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis toujours et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

Je remercie aussi mon grand-père et mes deux grands-mères (allah yerhamhom) pour leurs encouragements et leurs douaa qui nous ont aidé quand on en avait le plus besoin. Mes tantes et mes oncles et tous mes cousins Oussama, Mohamed, Boubeker et Nofel et Fahed , et cousines Hadjer , Wafaa , Houda, Amina, Cherifa,A mes amis de toujours Mehdi ,Aymen , Amine , Abdelillah ,Ismail , Mokhetar , Younes .A mes confrères et collègues Rabie ,Rayan, Mohamed ,El Hadi, Djalil.

sans oublier et spécialement à mon binôme Rabie qui a été toujours d'un sérieux irréprochable, pour les souvenirs pendants toutes ses années.

Sans oublier bien sûr Ghizlane et Dounia pour leurs soutiens .

Merci à vous tous, sans vous je ne suis rien, sans moi vous êtes tous.

Djamel

DEDICACE

Je dédie ce modeste et précieux mémoire à :

Mes chères parents et frères et a l'âme de mes grands-parents (Allah yerhamhom) ainsi que tous mes tentes et oncles et tous mes cousins.

Sans oublier mes amis : Said, Hamza, Yassine, Abdessamed, Faysal, Ayoub.

Ainsi que tous mes camarades de promotion surtout : Djamel, Djalil, Rayane, Mohamed.

Aussi à mes estimes professeurs qui ont été généreux de leur aide et de leur soutien tout au long de ma carrière universitaire, en particulier Mr.

Benramdane Mohammed, Mr. Benmansour Abdelkrim, Mr. Aliane Abdennour et Mme Saib Hind.

Mes dédicaces à Said Hadri et Mahieddine Amine.

Et spécialement à mon binôme Djamel qui a été toujours présent et sérieux avec moi.

Merci à vous tous, sans vous je ne suis rien, sans moi vous êtes tous.

Rabie

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Résumé

1. Introduction Générale :	20
2. Objectif du travail :	21
3. Contenu du mémoire	21
CHAPITRE 1 :	22
Recherche et analyse bibliographique	22
1. Introduction :	23
2. Définition de la ventilation :	24
4. Pourquoi privilégier le confort ?	24
a. Définition :	24
b. Confort respiratoire :	25
c. Confort thermique :	25
d. Confort pour la santé :	25
e. Confort des bâtiments :	25
5. Inertie de la ventilation dans un habitacle :	26
5.1. Le rôle de la ventilation	26
5.2. Comment fonctionne la ventilation ?	26
5.3. Importance d'une bonne ventilation :	27
5.3.1. Pour éliminer la condensation qui endommage votre maison :	27
5.3.2. Créer un environnement de vie plus sain et réduire l'asthme :	28
5.3.3. Soulager les symptômes du rhume des foins De nombreuses personnes souffrent du rhume des foins en été :	28
5.3.4. Réduire les effets du radon naturel Certaines régions du pays sont affectées par le radon :	29

5.3.5. Réduire l'impact des COV	29
6. Différents types d'installation de la ventilation :	30
6.1 .La ventilation naturelle dans un logement :	30
6.1.1. L'effet de vent :	32
6.1.2. L'effet du tirage thermique :.....	32
6.1.3. Effet combiné entre le vent et tirage thermique :.....	32
6.2. Types de ventilation naturelle :.....	33
6.2.1. Ventilation par l'ouverture en façade :	33
6.2.2. Ventilation d'un seul côté mono exposé :.....	33
6.2.3. Ventilation transversale :	33
6.2.4. Ventilation assistée par l'énergie renouvelable :	34
6.2.5. Comment fonctionne une ventilation naturelle ?.....	34
6.3. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux ou double flux.....	34
6.3.1. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux.....	35
6.3.2. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée double flux	36
6.3.3. La VMC double flux thermodynamique.....	37
6.3.4. La VMC à gaz.....	38
6.4. La Ventilation Mécanique Répartie ou VMR.....	38
6.5. VMI : Ventilation Mécanique Inversée ou par insufflation.....	40
6.6. La ventilation positive hygroréglable (VPH).....	41
6.7. La Ventilation Mécanique Ponctuelle ou VMP	41
7. Les zones de confort :	42
7.1. Définition :	42
7.2. Le confort respiratoire :.....	43
7.3. Le confort thermique :.....	43
7.4. Paramètres définissant la zone de confort :	44
7.5. Diagramme de l'ASHRAE et détermination d'une zone de confort :.....	46
7.6. Le confort thermique :.....	48
Les 6 paramètres qui déterminent le confort thermique :	48
7.6.1. La température et le confort ressenti :	49
7.6.2. La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon les mécanismes :	50
7.7. L'impact de l'humidité relative dans un bâtiment :	50
7.7.1. Confort et vitesse de l'air :	52
7.7.2. Le confort thermique est variable en fonction des individus.....	54

7.8.	Confort avec la qualité de l'air intérieur :	55
7.8.1.	La ventilation : confort sanitaire et santé :	55
7.8.1.1.	Définition du confort thermique dans un bâtiment :	56
7.8.1.2.	La température ambiante dans la maison :	57
	Qu'est-ce que la température confort ?	57
	La température des parois du logement	57
	Précision sur l'effusivité et la diffusivité des matériaux	58
7.8.1.3.	Le choix du mode de chauffage du bâtiment :	59
	Le chauffage par convection	59
	Chauffage par rayonnement	60
7.8.1.4.	Limiter les variations de températures :	61
A.	La température de consigne	61
B.	Régulation de la Température	61
C.	Limiter les apports solaires en été	62
D.	Travailler l'inertie de l'habitation	63
7.8.1.5.	Distribuer la chaleur dans les zones de vie	63
7.8.1.6.	Gérer l'humidité relative de l'air ambiant	64
	Les effets de l'humidité dans une maison	64
	C'est quoi le confort hygrothermique ?	64
7.8.1.7.	Maitriser les mouvements de l'air dans la maison	65
7.8.1.8.	Usages et habitudes de l'occupant	66
7.8.1.9.	Comment améliorer le confort thermique avec l'isolation ?	67
	Système d'isolation pour toute la maison	67
	La correction thermique sur les murs	68
	Conclusion : comment obtenir un bon confort thermique ?	68
7.9.	Le confort pour la santé :	68
7.10.	Le confort pour le bâtiment :	69
7.11.	Le confort visuel:	69
	Pour les salles de sports	70
	Pour les ateliers	71
7.12.	Le confort acoustique:	71
8.	Paramètres climatiques :	72
8.1.	Température de l'air :	72
8.2.	Le vent :	72

8.3.	Humidité de l'air :	72
8.4.	Précipitations :	72
8.5.	Rayonnement solaire :	73
9.	Les différentes méthodes d'amélioration des zones de confort :	73
9.3.	Le choix d'un mode de chauffage pour un bâtiment	75
9.3.1.	Le chauffage par convection.....	75
9.3.2.	Chauffage par rayonnement.....	76
CHAPITRE 2 :	.....	77
Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle	.....	77
1.Intoduction :	.....	78
2. Choix de la méthode numérique	.....	78
3. Principe de la méthode des volumes finis	.....	79
3.1.	Discrétisation spatiale du domaine d'étude.....	79
3.2.	Intégration des équations gouvernantes.....	79
3.3.	Formulation des approximations numériques.....	79
4.Discrétisation des équations gouvernantes :	.....	80
Équation de conservation de la masse (continuité) :	.....	80
Forme théorique (incompressible) :	.....	80
Équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) :	.....	81
Forme simplifiée (incompressible, laminaire ou turbulence modérée) :	.....	81
Équation de conservation de l'énergie (si les murs ne sont pas adiabatiques)	81	
Forme :	.....	81
5. Les équations gouvernantes pour le cas bidimensionnelle	.....	81
5.1. Équation de conservation de la masse (continuité) :	.....	82
a. Équations de conservation de la quantité de mouvement (Navier–Stokes 2D) :	.....	82
5.2. Équation de l'énergie :	.....	83
6.Les modèles de turbulence :	.....	83
6.1. Énergie cinétique turbulente k :	.....	84
6.2. Longueur de turbulence l :	.....	84
7. Notion de maillage dans la méthode des volumes finis	.....	85
7.1. Définition et fonction du maillage.....	85	
7.2.Caractéristiques essentielles d'un maillage performant	85	
7.3.Typologie des maillages.....	85	
7.4.Maillages structurés.....	86	

7.5. Maillages non structurés.....	86
7.6. Maillages hybrides	86
7.7. Considérations pratiques pour l'élaboration du maillage.....	86
8. Présentation des logiciels Gambit et Fluent.....	87
8.1. GAMBIT	87
8.2. Construction de la géométrie.....	88
8.3. Optimisation du maillage	88
8.4. Conditions aux limites et définition de domaines sur Gambit.....	90
8.5. Exportation du maillage de Gambit.....	91
8.6. PRÉSENTATION DE FLUENT	91
8.7. Interface du code Fluent.....	93
8.8. Conditions aux limites utilisées par le code FLUENT	97
8.9. Solution numérique	98
9. Conclusion :.....	101
CHAPITRE 3 :.....	102
Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation.....	102
1. Géométrie Etudie.....	103
2. Discrétisation spatiale du domaine d'étude.....	103
3. Modèle de turbulence :.....	104
3.1. k-Epsilon standard.....	104
4. Conditions aux limites :	104
5. Vitesse :.....	105
5.1 Contour de vitesse :	105
5.2. GRAPHES DE VITESSES :	107
5.3. Les lignes de vitesses :	109
6. Turbulence :	111
6.1 Contours de turbulence :.....	111
6.2 Graphe de turbulence :.....	113
6.3 Les lignes de turbulence :	115
7. Température :.....	117
7.1 Contours de température totale :.....	117
7.2 GRAPHES DE TEMPERATURE TOTAL :	119
7.3 Les lignes de température totale :.....	121
Conclusion.....	123

général	123
1. Conclusion général :	124
2. Perspectives	124

Liste des figure

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Figure 1: Schéma de principe de la ventilation simple[14].....	33
Figure 2: Schéma de fonctionnement d'une VMC simple flux[17].....	35
Figure 3: Principe de fonctionnement d'une VMC double flux[18].....	36
Figure 4: La VMC double flux thermodynamique[19].....	37
Figure 5: Schéma de fonctionnement d'une VMC avec raccordement au gaz[20].....	38
Figure 6: Répartition des échanges thermiques du corps humain.....	50
Figure 7: La plage de confort température-humidité.....	51
Figure 8: Diagramme Psychrométrique.....	52
Figure 9: Températures opératives correspondantes aux différentes plages de confort définies par la norme NBN EN 15251.....	55
Figure 10: Comparaison de l'impact de l'isolation thermique sur le confort intérieur.....	59
Figure 11: Comparaison des effets du mode de chauffage par convection et par rayonnement.....	61
Figure 12: Stratégies saisonnières de gestion énergétique pour un bâtiment.....	63
Figure 13: Les 6 paramètres qui influençant le confort hygrothermique.....	65
Figure 14: Critères d'un bon éclairage de poste de travail.....	70
Figure 15: Critères d'un bon éclairage pour une salle de sport.....	70
Figure 16: Critères d'un bon éclairage pour les ateliers.....	71

Chapitre 2 : Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Figure 1: Vue fenêtre Gambit [30].....	87
Figure 2: Les étapes pour construire une géométrie.....	88
Figure 3: Définition des conditions aux limites.....	91
Figure 4: Ouverture du fichier en Fluent.....	94
Figure 5: caractéristiques du fluide.....	95
Figure 6: équation d'énergie.....	95
Figure 7: Modèle de turbulence.....	96
Figure 8: Condition aux limites.....	97
Figure 9: Paramètres dynamique.....	98
Figure 10: Critère de convergence.....	99
Figure 11: Initialisation de la solution.....	100
Figure 12: Evolution des résidus.....	100

Chapitre 3: simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

Figure 1 : géométrie étudié.....	103
Figure 2: le maillage de la géométrie	103
Figure 3: Contour de vitesse.....	105
Figure 4: La variation de la vitesse pour différente section et différente configuration.....	107
Figure 5: les vecteurs de vitesses	109
Figure 6: Contours de turbulence	111
Figure 7: Graphes de turbulence	113
Figure 8: Vecteurs de turbulences	115
Figure 9: La variation du contour de température total en niveau des parois pour différent configuration	117
Figure 10: La variation de la température totale suivant différente section et différente configuration	119
Figure 11: Vecteurs de température total	121

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Tableau 1:la vitesse de l'air et du refroidissement équivalent..... 54

Tableau 2:Débits d'air minimaux recommandés par type de logement 56

Chapitre 2 : Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Tableau 1:Les différentes formes de maillage 89

Tableau 2:Description des différents types de maillages 90

NOMENCLATURE

Symboles Grandeurs Unités :

H : Hauteur de local [m]

L : La Longueur de Local [m]

Dh : Le Diamètre hydraulique [m]

u : La Vitesse suivant la direction x [m/s]

v : La Vitesse suivant la direction y [m/s]

g : La Constante de la Gravité [$\frac{m}{s^2}$]

ρ : La Masse Volumique [$\frac{kg}{m^3}$]

T : Température [K]

k : Conductivité Thermique (λ) [$\frac{W}{m*K}$]

P : Pression Statique [pascal]

Cp : Chaleur Spécifique [$\frac{J}{Kg*K}$]

I : Intensité (Taux de turbulence).

C_μ : Constant de model de turbulence.

l : Longueur de turbulence [m]

U : Vitesse d'entrée d'air [m/s]

x : Coordonnées spatiales horizontale [m]

y : Coordonnées spatiales verticale [m]

k : Énergie cinétique de turbulente [$\frac{m^2}{s^2}$]

Lettres Gracques :

ε : taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence [$\frac{m^2}{s^3}$]

μ : viscosité dynamique [$\frac{Kg}{m*s}$]

Abréviations :

CFD: Computational Fluid Dynamics.

Gambit: Geometry and Mesh building intelligent Toolkit.

Indices :

Symbole Désignation

(x, y, z) coordonnées cartésiennes

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تحسين الراحة الحرارية في مقصورات الركاب (السيارات أو الطائرات أو الهندسة المعمارية) من خلال دراسة متعمقة لأنظمة التهوية. الهدف الرئيسي هو تحليل وتحسين توزيع الهواء من أجل توحيد الظروف الحرارية في مساحة مغلقة، والقضاء على مناطق الاضطراب وضمان الراحة الموحدة للسكان لكابينة مبسطة ثنائية الأبعاد (طولها 5 (CFD) تعتمد الدراسة على النمذجة الرقمية لديناميكيات السوائل الحسابية أمتار × ارتفاعها 3.5 متر) بما في ذلك نافذة تهوية بارتفاع 0.5 متر. تسمح عمليات محاكاة ديناميكا الموائع الحسابية بتحليل دوران الهواء والركود الحراري وظواهر انتقال الحرارة، حيث تكون المتغيرات الرئيسية هي (القياسي $k-\epsilon$ نموذج) موضع النافذة وظروف الحدود الحرارية ومعلومات الاضطرابات وتوضح النتائج أن موضع مداخل الهواء يؤثر بشكل كبير على التجانس الحراري. يوفر المدخل الموجود في منتصف الارتفاع (2 متر) أفضل حل وسط من خلال إنشاء خلايا إعادة تدوير فعالة، في حين يعمل المدخل المرتفع (3 متر) على توليد مناطق راكدة ويحد المدخل المنخفض (1-1.5 متر) من الاختلاط في الأجزاء العلوية. يتم تفسير هذه الملاحظات من خلال التفاعلات بين الحمل الحراري الطبيعي والطبقة الحرارية والاضطرابات يؤكد هذا البحث أن نهج ديناميكا الموائع الحسابية يعد أداة قوية لتحسين أنظمة التهوية. وتشمل الآفاق التوسع في النماذج ثلاثية الأبعاد، والتحقيق في الهندسة الأكثر تعقيداً، واستكشاف نماذج الاضطرابات المتقدمة لتحسين حلول الهندسة الحرارية. إن النتائج التي تم الحصول عليها لها تطبيقات محتملة في مجالات مختلفة تتطلب التحكم الدقيق في الراحة الحرارية.

Résumé

Ce mémoire s'intéresse à l'optimisation du confort thermique dans les habitacles (automobiles, aéronautiques ou architecturaux) par une étude approfondie des systèmes de ventilation. L'objectif principal est d'analyser et d'améliorer la distribution de l'air afin d'homogénéiser les conditions thermiques dans un espace clos, en éliminant les zones de perturbation et en garantissant un confort uniforme pour les occupants.

L'étude se base sur la modélisation numérique par mécanique des fluides computationnelle (CFD) d'un habitacle simplifié en 2D (5m de longueur \times 3,5m de hauteur) comprenant une fenêtre de ventilation de 0,5m de hauteur. Les simulations CFD permettent d'analyser les phénomènes de circulation d'air, de stagnation thermique et de transferts de chaleur, avec comme variables clés la position de la fenêtre, les conditions aux limites thermiques et les paramètres de turbulence (modèle k- ϵ standard). Les résultats démontrent que la position des entrées d'air influence significativement l'homogénéisation thermique. Une entrée positionnée à mi-hauteur (2m) offre le meilleur compromis en créant des cellules de recirculation efficaces, tandis qu'une entrée haute (3m) génère des zones stagnantes et qu'une entrée basse (1-1,5m) limite le mélange dans les parties supérieures. Ces observations s'expliquent par les interactions entre convection naturelle, stratification thermique et turbulence.

Cette recherche valide l'approche CFD comme outil puissant pour l'optimisation des systèmes de ventilation. Les perspectives incluent l'extension vers des modèles 3D, l'étude de géométries plus complexes et l'exploration de modèles de turbulence avancés pour affiner les solutions d'ingénierie thermique. Les résultats obtenus ont des applications potentielles dans divers domaines nécessitant un contrôle précis du confort thermique.

Mots-clés : Ventilation, Confort thermique, CFD, Turbulence k- ϵ , Stratification thermique, Optimisation.

Abstract :

This thesis focuses on optimizing thermal comfort in passenger compartments (automotive, aeronautical, or architectural) through an in-depth study of ventilation systems. The main objective is to analyze and improve air distribution in order to homogenize thermal conditions in an enclosed space, eliminating areas of disturbance and ensuring uniform comfort for occupants.

The study is based on computational fluid dynamics (CFD) modeling of a simplified 2D passenger compartment (5 m long \times 3.5 m high) including a 0.5 m high ventilation window. CFD simulations allow for the analysis of air circulation, thermal stagnation, and heat transfer phenomena, with key variables being the window position, thermal boundary conditions, and turbulence parameters (standard k- ϵ model).

The results demonstrate that the position of the air inlets significantly influences thermal homogenization. An inlet positioned at mid-height (2 m) offers the best compromise by creating efficient recirculation cells, while a high inlet (3 m) generates stagnant zones and a low inlet (1-1.5 m) limits mixing in the upper parts. These observations are explained by the interactions between natural convection, thermal stratification, and turbulence.

This research validates the CFD approach as a powerful tool for optimizing ventilation systems. Future prospects include extending the approach to 3D models, studying more complex geometries, and exploring advanced turbulence models to refine thermal engineering solutions. The results obtained have potential applications in various fields requiring precise control of thermal comfort.

Introduction

Générale

Introduction générale

1. Introduction Générale :

La recherche d'un confort thermique optimal dans les habitacles, qu'ils soient automobiles, aéronautiques ou architecturaux, constitue un enjeu majeur en ingénierie thermique et aérodynamique. En particulier, l'homogénéisation des zones de confort à l'intérieur d'un espace clos est essentielle pour garantir le bien-être des occupants et optimiser l'efficacité des systèmes de ventilation. Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à l'étude de la ventilation d'un habitacle dans le but d'identifier et de corriger les zones perturbées par les flux d'air, afin d'établir une distribution thermique uniforme sur l'ensemble du volume considéré et assuré le confort des occupants. L'habitacle étudié présente une géométrie simplifiée en deux dimensions, avec une longueur de 5 mètres et une hauteur de 3,5 mètres, comprenant une fenêtre carré d'une arête de 0,5 mètre. Cette configuration permet d'analyser les phénomènes de circulation d'air, les zones de stagnation thermique et les déséquilibres de température pouvant affecter le confort. L'objectif principal de cette étude est de modéliser et d'optimiser le système de ventilation afin de minimiser les perturbations aérauliques et d'assurer une homogénéisation des conditions thermiques dans tout l'espace. Pour y parvenir, une approche numérique basée sur la mécanique des fluides computationnelle (CFD) sera mise en œuvre basée sur le logiciel Fluent 6.3.26, permettant de simuler les écoulements d'air et les transferts thermiques au sein de l'habitacle. Les résultats obtenus serviront à proposer des améliorations dans la conception des systèmes de ventilation, en ajustant par exemple la position des entrées et sorties d'air, leur débit, ou encore leur orientation. À travers cette étude, nous cherchons non seulement à améliorer la compréhension des mécanismes de ventilation dans un espace confiné, mais aussi à fournir des solutions pratiques pour éliminer les zones d'inconfort et garantir une expérience thermique optimale pour les utilisateurs. Les implications de cette recherche pourraient s'étendre à divers domaines, depuis l'industrie automobile jusqu'à l'optimisation énergétique des bâtiments, soulignant ainsi son importance à la fois théorique et appliquée.

Introduction générale

2. Objectif du travail :

L'objectif de cette étude est de gérer les zones perturbées par la ventilation afin de les éliminer et créer des zones de confort homogènes dans les volumes thermiques.

La maîtrise du code Fluent sera notre priorité avant toute autre tâche. Nous nous concentrerons d'abord sur le préprocesseur Gambit afin de créer une géométrie, de générer un maillage et d'incorporer les conditions aux limites. Par la suite, nous nous pencherons sur le code de simulation en lui-même.

3. Contenu du mémoire

Ce mémoire se divise en trois chapitres.

Le premier chapitre aborde les concepts généraux ainsi que les différents types de ventilation.

Le deuxième chapitre présente une formulation numérique et introduit le générateur de maillage GAMBIT ainsi que le code de calcul FLUENT.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation et à la discussion des résultats des simulations obtenues avec FLUENT.

Enfin, le mémoire se conclut par un bilan général de cette étude, accompagné de recommandations pour son prolongement.

CHAPITRE 1 :
Recherche et analyse
bibliographique

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

1. Introduction :

L'utilisation de l'air extérieur pour la ventilation naturelle, combinée aux méthodes de refroidissement naturel et à l'exploitation de la lumière naturelle, a toujours été un aspect fondamental de l'architecture depuis les temps anciens jusqu'au début du XXe siècle (ASHRAE,2007b). L'architecture classique a mis en œuvre des plans en H,L,T ou U, intégrant des cours ouvertes, une profondeur de plan limitée et maximisant les taille de fenêtres, afin de tirer parti de la ventilation naturelle et de la lumière du jour. Récemment, dans les pays à revenu élevé et intermédiaire, la ventilation naturelle a été largement supplantée par des systèmes de ventilation mécanique. A l'origine, ces systèmes complets de chauffage, ventilation et climatisation semblaient promettre de résoudre tous les défis pratiques associés à la ventilation naturelle pour un contrôle constant des conditions environnementales intérieures tout au long de l'année.

Cependant, la ventilation mécanique nécessite également une conception méticuleuse, un entretien rigoureux des équipements, ainsi que l'adoption de normes strictes et de directives de conception englobant tous les aspects de la qualité de l'environnement intérieur et de l'efficacité énergétique (ASHRAE, 2007b). Cela s'applique également à la ventilation naturelle de pointe . La ventilation naturelle pose néanmoins des défis, surtout pour les installations situées dans des régions aux hivers rigoureux. Il est essentiel de développer davantage des systèmes de ventilation qui soient à la fois abordables et fiables, favorisant ainsi la circulation de l'air tout aussi performants pour combattre les infection. Cependant, la ventilation naturelle ne peut fonctionner que lorsque des forces naturelles, comme le vent ou les brises, sont présentes, et lorsque les ouvertures d'entrée et de sortie demeurent accessibles. En revanche, les complication liées à la mise en place et au bon entretien d'un système de ventilation mécanique peuvent engendrer une concentration accrue de gouttelettes infectieuses, augmentant ainsi le risque de transmission de maladies.

Dans les établissements de santé existants équipés d'une ventilation naturelle, il est impératif d'optimiser ce système autant que possible avant d'envisager d'autre solutions de ventilation. Cela étant dit, cela est conditionné par des conditions climatique adaptées à son efficacité.[1]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

2. Définition de la ventilation :

La ventilation désigne le processus de renouvellement de l'air dans un espace fermé par son brassage. Elle est nécessaire dans des environnements où le risque de déficit en oxygène existe, ou là où des polluants et autres éléments indésirables, comme l'humidité, pourraient s'accumuler en son absence : habitations , bureaux , commerces ,salles de spectacle, établissement scolaires, infrastructures souterraines, tunnels routiers, ateliers industriels, mines... Elle vise également à garantir le confort thermique des occupants.

La ventilation d'un espace en général a plusieurs objectifs :

- renouveler l'air ambiant, le rendre sain et dépoussiérer.
- assurer la régulation thermique (chauffage ou refroidissement) de l'endroit.
- contrôler le taux d'hygrométrie (humidité).
- surveiller la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) et de divers polluants intérieurs.

Selon l'environnement dans le quel elle est appliquée, l'un de ces objectifs est souvent privilégié.[2]

3. Pourquoi est-il nécessaire de ventiler ou d'aérer ?

Les actions humaines telles que faire la lessive , nettoyer , cuisiner ou transpirer génèrent une quantité considérable de vapeur d'eau à l'intérieur des habitations. Cette humidité doit être évacuée afin de prévenir des soucis de condensation et l'apparition de moisissures. De plus , l'homme a besoin d'oxygène, qui doit provenir d'air extérieur propre, autrement cela peut provoquer des problèmes physiologiques qui affectent le métabolisme. En outre , des facteurs tels que la présence de verdure et le prestige impactent plusieurs dimensions climatiques, esthétiques et psychologiques du confort.

4. Pourquoi privilégier le confort ?

a. Définition :

Le confort est un concept englobant qui inclut plusieurs facteurs tels que la température l'éclairage, le son , le paysage , l'eau , la présence de verdure et le prestige. Ces éléments impactent les dimensions climatiques, esthétique et psychologique du confort.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Il est crucial de reconnaître que le confort est une perception subjective qui n'existe pas elle-même.

b. Confort respiratoire :

Une ventilation adéquate pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur est essentielle pour les métabolismes et l'hygiène individuelle. La ventilation associée à une diminution des pollutions à la source assurer une respiration améliorée et un meilleur bien-être. Certaines recherches montrent que la teneur en dioxyde de carbone sert d'indicateur de la qualité de l'air.[3]

Une plage de concentration de dioxyde de carbone associée à une qualité de l'air satisfaisante a été définie. Ce gaz est émis par la respiration des êtres humains, et sa concentration ne peut être considérablement diminuée que grâce à une ventilation adéquate, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Le niveau de ventilation requis pour garder les concentrations intérieures de dioxyde de carbone à un seuil réduit contribue également à abaisser les niveaux d'autres contaminants présentes à l'intérieur, ce qui améliore donc la qualité générale de l'air intérieur.

c. Confort thermique :

Le confort thermique représente une condition fondamentale dans les espaces bâtis, et le concepteur doit s'assurer d'y répondre adéquatement. L'environnement thermique se définit par quatre variables physique : la température de l'air, l'intensité du rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse du vent. Ces éléments interagissent avec l'activité humaine et les vêtements pour déterminer leur condition thermique et forment ensemble les six paramètres essentiels de l'échange de chaleur entre l'homme et son environnement.[4]

d. Confort pour la santé :

Certains facteurs présents dans l'environnement intérieur peuvent entraîner des problèmes de santé. Ces derniers dépendent de l'âge, du sexe et de l'état de santé, mais sont surtout influencés par la sensibilité personnelle. On peut également différencier les problèmes de santé en fonction de leur nature objective ou subjective.

e. Confort des bâtiments :

La majorité des problèmes rencontrés dans les bâtiments découle de la présence d'une humidité non souhaitée. L'humidité dans les habitation peut provenir de toits défectueux, de solins mal exécutés, de fenêtres et de portes qui ne s'ajustent pas convenablement, de condensation sur des ponts thermiques, d'humidité due à des courants d'air ascendants, et de fuites au niveau de la plomberie. Cette humidité peut nuire aux bâtiments et engendrer des conditions malsaines, entraînant ainsi des difficultés telles que: la dégradation des finitions, à savoir la peinture, le papier peint et

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

les plafonds. La prolifération de moisissures affectant la structure et le bois de l'immeuble. La diminution des performances d'isolation.

5. Inertie de la ventilation dans un habitacle :

5.1. Le rôle de la ventilation

Dans les habitations, la ventilation est souvent négligée et sous-estimée, qu'il s'agisse de maisons individuelles, d'appartements ou d'entreprises, alors qu'elle joue un rôle crucial pour le confort intérieur, tout comme l'isolation et les systèmes de chauffage. Il est donc important de définir ce qu'est la ventilation. Les systèmes de ventilation sont des composants fondamentaux pour réguler et préserver la qualité de l'air à l'intérieur d'un logement, tout en garantissant des niveaux d'humidité appropriés pour le bien-être des occupants et la santé globale du bâtiment. La ventilation représente un dispositif discret mais vital, dont l'absence ou le dysfonctionnement met immédiatement en péril la santé des occupants et provoque la dégradation d'une ou plusieurs zones de l'habitation. [5]

5.2. Comment fonctionne la ventilation ?

La ventilation a pour but de substituer l'air intérieur par de l'air frais provenant de l'extérieur. À l'intérieur des habitations, les êtres vivants, qu'ils soient humains ou animaux, émettent de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone, créant ainsi de l'air stagnant.

C'est pourquoi il est essentiel de faire entrer de l'air frais. Les espaces désignés comme « humides », tels que les cuisines, les salles de bains et les toilettes, nécessitent également un renouvellement de l'air prioritaire. Cela est crucial pour prévenir des niveaux d'humidité excessifs qui peuvent causer des problèmes tels que la formation de moisissures et de salpêtre. D'un point de vue pratique, il est parfois suffisant d'ouvrir les fenêtres de la maison pour remplacer l'air et l'humidité emprisonnés par de l'air frais, une méthode pratiquée par les générations antérieures.

À l'époque, ce système était la seule façon de purifier l'habitat. Cependant, son efficacité laissait à désirer, et il était compliqué de chauffer la maison durant l'hiver en gardant les fenêtres ouvertes. En résumé, il est fondamental de comprendre que la ventilation d'un logement consiste à échanger l'air humide et pollué contre de l'air extérieur « frais » et sain pour maintenir la santé des occupants ainsi que celle de la maison. [6]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

5.3. Importance d'une bonne ventilation :

La ventilation élimine l'humidité, la fumée, les odeurs de cuisine et les polluants intérieurs. La ventilation structurelle contrôle les niveaux de chaleur dans le grenier, régule l'humidité dans les vides sanitaires et les sous-sols et empêche l'humidité de pénétrer par les murs non isolés. Tout ce qui entrave la circulation de l'air dans la maison peut être préjudiciable à l'habitation et à la santé. L'une des raisons pour lesquelles la ventilation est si importante est qu'elle contrôle la quantité d'humidité qui reste dans votre maison. Sans système de ventilation, vous ne pouvez pas contrôler le flux d'air dans votre bâtiment. Raisons pour lesquelles votre maison a besoin d'une bonne ventilation

5.3.1. Pour éliminer la condensation qui endommage votre maison :

Selon une enquête récente de My Health My Home, 58 % des maisons souffrent de condensation. Tout le monde sait ce qu'est la condensation, mais quelles en sont les causes et que peut-on faire pour y remédier ? Si vous avez déjà sorti une boisson du réfrigérateur et remarqué des gouttes d'eau sur l'extérieur de la canette, vous avez vu de vos propres yeux de la condensation. Les raisons de ce phénomène sont liées à la température, à l'air et à la vapeur d'eau. La température à la surface de la boîte de conserve diminue au fur et à mesure que l'air passe au-dessus d'elle. Lorsque l'air se refroidit, l'humidité relative augmente et la vapeur d'eau se transforme en humidité. L'air qui passe au-dessus de la boîte ne peut pas retenir l'humidité et celle-ci s'écoule à la surface de la boîte froide sous forme de gouttelettes d'eau. Ce phénomène se produit dans des milliers de foyers à travers le pays lorsque la température à l'intérieur de la maison baisse, en particulier la nuit lorsque le chauffage est éteint. L'air ne peut plus contenir toute l'humidité créée dans la maison et celle-ci se déplace vers les surfaces les plus froides (fenêtres, murs et derrière les meubles), où elle apparaît sous forme de condensation et de gouttelettes d'eau sur les fenêtres. La condensation est particulièrement visible en hiver, lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la maison est importante. Cela signifie que lorsque le chauffage est éteint, la température à l'intérieur de la pièce baisse rapidement et atteint bientôt le point de saturation de 100 %. Lorsque l'air se refroidit, une partie de l'humidité ne peut être retenue sous forme de vapeur d'eau invisible et commence à former des gouttelettes. La

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

condensation est la forme la plus courante d'humidité et conduit finalement à la formation de moisissures. Au fil du temps, des taches d'humidité apparaissent sur les murs, le papier peint commence à se détacher et de la moisissure noire se développe. Cela peut entraîner une odeur de moisi, endommager la structure de la maison et même causer des problèmes de santé. L'installation d'une ventilation adéquate avec une unité de contrôle de la condensation permettra de ventiler doucement toute la maison à partir d'un point central, tel qu'un palier, transformant l'air stagnant et vicié en un environnement frais, sain et sans condensation.

5.3.2. Créer un environnement de vie plus sain et réduire l'asthme :

Saviez-vous que l'humidité et la moisissure sont les principaux déclencheurs de l'asthme ?

Une maison mal ventilée et très humide est un terrain propice à la prolifération des acariens. Les acariens et leurs matières en suspension dans l'air peuvent se développer dans une maison mal ventilée. Lorsque ces substances toxiques entrent en contact avec la peau ou sont inhalées, elles peuvent provoquer des réactions allergiques, entraînant des crises d'asthme, de l'eczéma, des larmoiements, des démangeaisons, des éternuements et des écoulements nasaux. Ces problèmes peuvent être considérablement réduits grâce à des systèmes de ventilation efficaces, et certaines personnes souffrant d'asthme ont constaté des bénéfices immédiats lorsque de tels systèmes ont été installés dans leur maison.

5.3.3. Soulager les symptômes du rhume des foins De nombreuses personnes souffrent du rhume des foins en été :

Un système de ventilation efficace peut filtrer les grosses particules telles que le pollen et les empêcher de pénétrer dans la maison. Grâce à un système de ventilation, il n'est pas nécessaire d'ouvrir les fenêtres, ce qui peut être un problème pour les personnes souffrant de rhume des foins. Les systèmes de ventilation pourraient être la solution pour un été plus agréable. Grâce à des systèmes de ventilation efficaces, certains patients souffrant d'affections saisonnières telles que le rhume des foins et les allergies au pollen ont constaté une amélioration de leurs symptômes. L'apport constant d'air fraîchement filtré dans la maison peut avoir un impact positif sur la santé en contrôlant les polluants dans l'atmosphère intérieure.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

5.3.4. Réduire les effets du radon naturel Certaines régions du pays sont affectées par le radon :

Le radon est un gaz radioactif inodore et incolore formé par la désintégration de petites quantités d'uranium naturellement présentes dans les roches et le sol. Ce gaz produit un autre élément radioactif appelé « fille du radon », qui se fixe aux particules de poussière présentes dans l'air et qui, lorsqu'il est inhalé, adhère aux voies respiratoires des poumons. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) affirme que l'exposition au radon est associée à 3 à 14 % de tous les cas de cancer du poumon. Le radon se trouve principalement dans les régions où le granit et d'autres roches ignées sont abondants et il est largement répandu dans des régions telles que le Sud-Ouest et les East Midlands. Si vous vivez dans une zone affectée par le radon, il vaut la peine de faire inspecter votre maison. Vous pouvez également ramener le radon à des niveaux sûrs et réduire les risques pour votre santé en installant un système de ventilation à aspiration positive.

5.3.5. Réduire l'impact des COV

Les composés organiques volatils (COV) sont des gaz invisibles qui peuvent causer un certain nombre de problèmes de santé dans les habitations. Le Comité scientifique des risques sanitaires et environnementaux estime que l'air intérieur contient pas moins de 900 substances chimiques, et que leurs effets négatifs sont plus fréquents dans les logements mal ventilés. En fait, selon les chiffres de l'Agence pour la protection de l'environnement, l'air à l'intérieur d'une maison peut être 70 % plus pollué qu'à l'extérieur. Les COV peuvent provenir de diverses sources, notamment des cosmétiques, des désodorisants et de la magie à base d'huile. Après certaines tâches, comme le nettoyage ou le décapage de peinture, les niveaux de COV peuvent être jusqu'à 1 000 fois plus élevés que les niveaux de base à l'extérieur. Les propriétaires peuvent prendre des mesures pour se protéger et protéger leur famille en installant des systèmes de ventilation efficaces conçus pour introduire en permanence de l'air frais et propre à l'extérieur et pour diluer et contrôler les COV dans la maison. [7]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

6. Différents types d'installation de la ventilation :

6.1 .La ventilation naturelle dans un logement :

La ventilation naturelle s'appuie sur des notions simples, qui permettent d'aérer le logement sans nécessiter la mise en place du moindre système. Il peut alors s'agir d'ouvrir les fenêtres, de ventilation traversante (tirage dû au vent), ou encore de tirage thermique. L'ouverture des fenêtres est la solution la plus simple pour renouveler l'air intérieur de son logement. L'aération quotidienne des pièces reste vivement recommandée et ce, quel que soit le moment de l'année.

Cette aération quotidienne n'a pourtant vocation qu'à écrêter les pics de pollution, après la nuit en particulier, du fait du dégagement de CO₂ par les dormeurs et du fait de la libération dans l'air des polluants domestiques : COV (formaldéhyde, benzène, phtalates etc.), PCB (polychlorobiphényles), contenus dans les mousses des matelas et coussins, les peintures, aérosols etc.

La ventilation traversante permet de faire entrer l'air frais provenant de l'extérieur d'un côté de la maison et d'évacuer l'air chaud et pollué par l'autre côté. Pour ce faire, des entrées et des sorties d'air doivent être placées de part et d'autre du logement, de sorte à ce que le système puisse tirer parti du vent et favoriser les courants d'air.

Le tirage thermique se base sur le fait que l'air chaud est plus léger que l'air froid. La ventilation par tirage thermique consiste à installer des grilles d'aération hautes et basses dans le logement. Ainsi, des entrées d'air situées au bas des murs permettent à l'air frais de pénétrer dans l'habitable et des bouches raccordées à un conduit vertical évacuent l'air chaud par le toit. L'ajout d'un extracteur, ayant pour effet de créer une dépression supplémentaire, peut contribuer à améliorer la ventilation naturelle du logement. [8]

C'est le système de ventilation le plus simple. Il consiste à renouveler l'air en aménageant :

- Des ouvertures sur les portes, les fenêtres ou les murs des pièces principales.
- Des ouvertures de transfert entre les pièces, lesquelles sont placées généralement sous les portes intérieures.
- Des sorties d'air dans les pièces humides (cuisine, salle de bain, toilettes) pour évacuer l'humidité.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment favorise la circulation de l'air (balayage naturel). La ventilation est générée par deux

phénomènes : la force du vent à l'extérieur et le tirage thermique à l'intérieur.

Certes, la VN est un système de ventilation économique et facile à mettre en place. Cela dit, elle présente deux inconvénients majeurs :

- Le mouvement de l'air n'étant pas contrôlé, entraîne d'importantes déperditions thermiques.
- La ventilation est moins efficace qu'une VMC, car le renouvellement de l'air dépend largement de la vitesse du vent à l'extérieur. [9]

Les forces naturelles (par exemple les vents et la force de poussée thermique due aux différences de densité de l'air intérieur et extérieur) poussent l'air extérieur à travers des ouvertures spécialement conçues dans l'enveloppe du bâtiment. Les ouvertures spécialement conçues comprennent les fenêtres, les portes, les cheminées solaires, les tours éoliennes et les ventilateurs à ruissellement. Cette ventilation naturelle des bâtiments dépend du climat, de la conception du bâtiment et du comportement humain. [10]

Elle consiste à simplement engendrer des courants d'air dans les habitats par le biais d'orifices d'entrée d'air en partie basse des murs des pièces principales et des bouches de sortie en partie haute des pièces humides. Dans ce mécanisme, le débit est très mal maîtrisé car il est fonction du vent, des conditions climatiques, de la saison... et peut conduire à une sous-ventilation ou au contraire à une sur ventilation suscitant des demandes inutiles en chauffage. [11]

La ventilation naturelle est utilisée en approche bioclimatique pour procurer l'air frais nécessaire aux occupants pour leur santé et contrôler la température pour leur confort. Les bouches d'aération sont utilisées pour contrôler et diriger la circulation de l'air dans ce système. Ce type de système passif régule la température de l'air, aspiré tout en expulsant l'air vicié. La ventilation naturelle et l'infiltration d'un bâtiment sont déterminées par la différence de pression à travers la structure du bâtiment entre

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

l'intérieur et l'extérieur ; Cette différence de pression est le résultat de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur qui entraîne une différence de densité de l'air.[12]

6.1.1. L'effet de vent :

Sous l'effet du vent extérieur, la distribution de la pression statique au vent augmente, ce qui donne lieu à une région à pression positive ou élevée. Des tourbillons peuvent se produire du côté sous le vent, ce qui forme une région à basse pression ou négative. Sous l'effet du gradient de pression, l'air est entraîné du domaine à pression positive vers la région à pression négative.[11]

6.1.2. L'effet du tirage thermique :

Dans ce cas la ventilation est par flottaison d'air, se produit en raison des variations de densité dues aux variations de température et de hauteur entre le milieu intérieur et le milieu extérieur ou entre des zones déterminées à l'intérieur d'un bâtiment ; ces variations entraînent des différences de densité de l'air et donc du gradient de pression de ces zones. Quand l'air intérieur est plus chaud que l'air extérieur, il va entrer par les ouvertures situées en bas du bâtiment et sortir par les ouvertures situées en haut du bâtiment. [13]

6.1.3. Effet combiné entre le vent et tirage thermique :

En réalité, ces deux moteurs de ventilation agissent simultanément et peuvent avoir des effets complémentaires ou opposés. On considère qu'au-delà de 3 m/s, l'action du vent devient alors dominante sur les autres forces motrices des systèmes de ventilation.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

6.2. Types de ventilation naturelle :

6.2.1. Ventilation par l'ouverture en façade :

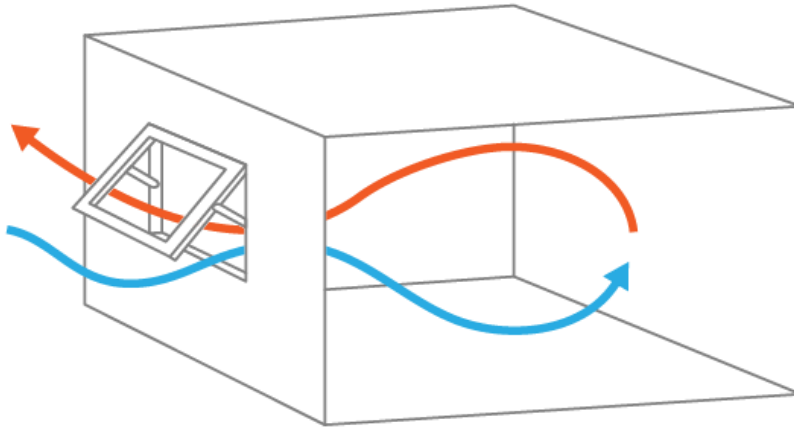


Figure 1: Schéma de principe de la ventilation simple[14]

Une "stratégie de ventilation" fait référence à la manière dont l'air est introduit dans un bâtiment et à la manière dont il en est extrait. Comme pour les habitations de faible hauteur, les différentes stratégies utilisées pour ventiler les habitations de grande hauteur peuvent être classées en grandes catégories selon le nombre de l'ouverture dans les façades [9].

6.2.2. Ventilation d'un seul côté mono exposé :

La ventilation sur un seul côté exposé est le cas dans lequel il n'y a qu'un seul côté une seule façade de l'espace ventilé tandis que l'autre côté est partitionné où l'air frais entre dans la chambre par l'ouverture du même côté que celui par lequel il est évacué. Cette stratégie permet de ventiler efficacement l'espace si la profondeur de la Chambre est au maximum de 2,5 fois sa hauteur. La force motrice de la ventilation unilatérale est le vent qui coïncide avec la différence de température entre les entrées d'air basses et les sorties d'air hautes. L'effet de flottabilité peut également favoriser la ventilation unilatérale si les ouvertures de ventilation sont situées à des hauteurs différentes [9].

6.2.3. Ventilation transversale :

La ventilation transversale est basée sur la circulation de l'air entre les deux côtés de son enveloppe en raison des différences de pression entre les ouvertures des deux côtés (l'air se déplace du côté au vent vers le côté sous le vent). Pour une ventilation transversale efficace, la profondeur de la chambre ne doit pas dépasser cinq fois sa

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

hauteur. L'effet de flottaison peut également favoriser l'efficacité de la ventilation transversale lorsque les chambres font face à un grand espace ouvert. [15]

6.2.4. Ventilation assistée par l'énergie renouvelable :

Les constructeurs ont conçu de nombreux systèmes pour améliorer la ventilation naturelle grâce à l'utilisation de certains types d'énergie renouvelable. Nous reconnaissons deux types d'énergie : le solaire (la cheminée solaire) et l'éolien (la tour à vent) et leur rôle dans la ventilation.[12]

6.2.5. Comment fonctionne une ventilation naturelle ?

La ventilation naturelle repose sur un principe physique simple : l'air chaud, plus léger que l'air froid, monte et génère un tirage d'air naturel dans le logement. Un **balayage permanent** est ainsi créé dans le logement et l'aération naturelle est mise en place.

L'air extérieur entre dans les pièces principales et se déplace vers les pièces humides (cuisine, WC, salle de bains) et plus chaudes. Un taux d'humidité élevé est propice au développement de moisissures et mauvaises odeurs. Dans ces espaces, l'évacuation de l'humidité se fait par le conduit des bouches d'aération. Ce conduit débouche en toiture.[16]

a. Avantages

Le grand avantage de la ventilation naturelle (ouvrir soi-même régulièrement les fenêtres, les grilles et les portes pour rafraîchir l'air de son logement) est qu'elle est très simple. Du moins, si vous pensez à le faire.

b. Inconvénients

L'inconvénient est qu'il ne s'agit pas d'un système automatisé. Vous le remarquerez en hiver, par exemple, lorsque vous n'êtes pas aussi enclin à tout ouvrir, alors que vous le devriez. Un autre inconvénient est que vous avez peu de contrôle sur la quantité d'air introduite et évacuée. Par exemple par temps de brouillard ou d'orage.

6.3. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux ou double flux

La VMC, ou ventilation mécanique contrôlée, est le système de ventilation le plus couramment employé dans les bâtiments. La VMC est équipée d'un système motorisé qui assure le renouvellement de l'air intérieur des pièces d'un logement en continu. La ventilation mécanique contrôlée peut être simple flux ou double flux.[8]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

La ventilation mécanique contrôlée (VMC) est considérée comme le complément nécessaire d'une isolation efficace et d'un chauffage performant. Elle garantit à la fois le contrôle de l'humidité et du renouvellement d'air du logement, tout en limitant fortement les pertes thermiques pour les modèles à double flux. Il y a lieu de différencier les systèmes centralisés de ceux qui traitent séparément les pièces humides (cuisine, salle d'eau, WC). Ces derniers présentent l'intérêt d'un faible coût d'installation et la simplicité de leur entretien.[11]

6.3.1. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux

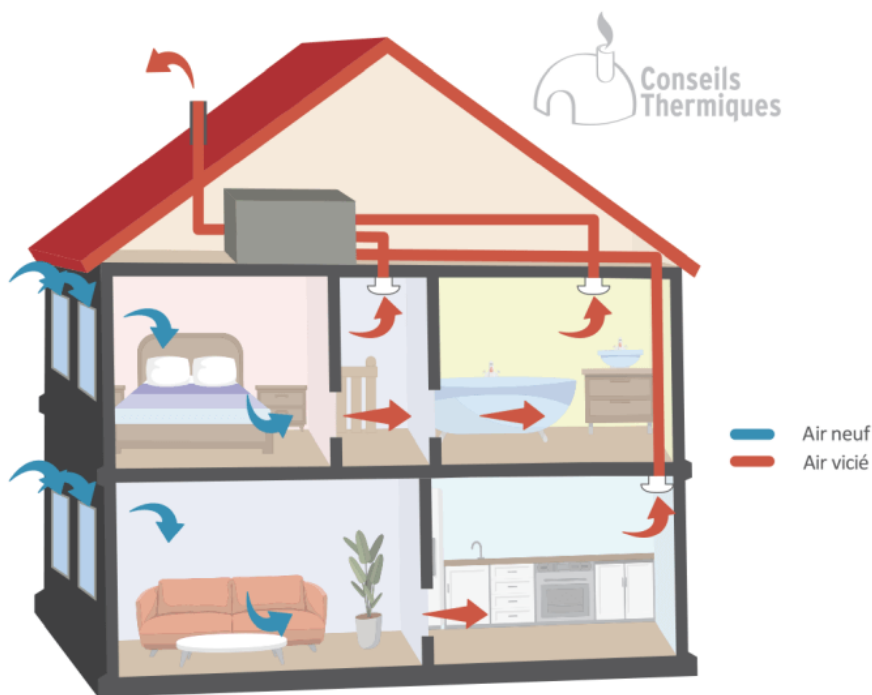


Figure 2:Schéma de fonctionnement d'une VMC simple flux[17]

La VMC simple flux fonctionne de la manière suivante : l'air qui provient de l'extérieur entre dans le logement par l'intermédiaire des entrées d'air, bien souvent situées en haut des fenêtres des pièces principales. Cet air est ensuite évacué par les bouches d'extraction (raccordées à un petit moteur) qui se trouvent dans les pièces les plus humides du logement, à savoir la cuisine, la salle de bains ou encore les toilettes, après avoir permis un flux d'air traversant tout le volume du logement [8].

C'est le dispositif le plus simple, utilisé fréquemment dans les logements individuels : des entrées d'air sont placées dans les pièces à vivre (chambres, salon, etc.) communément au niveau des fenêtres. Les bouches d'extraction de l'air sont

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

positionnées au niveau des pièces humides (salle de bains, cuisine, buanderie) et rattachées à un système d'extraction mécanique. Suite à une dépressurisation légère du volume de l'habitat, l'air extérieur est aspiré en premier lieu vers les pièces sèches puis circule vers les pièces humides (dont il prélève une partie d'humidité) avant d'être expulsé par les bouches d'extraction.[11]

6.3.2. VMC : la Ventilation Mécanique Contrôlée double flux

PRINCIPE DE LA VMC DOUBLE FLUX

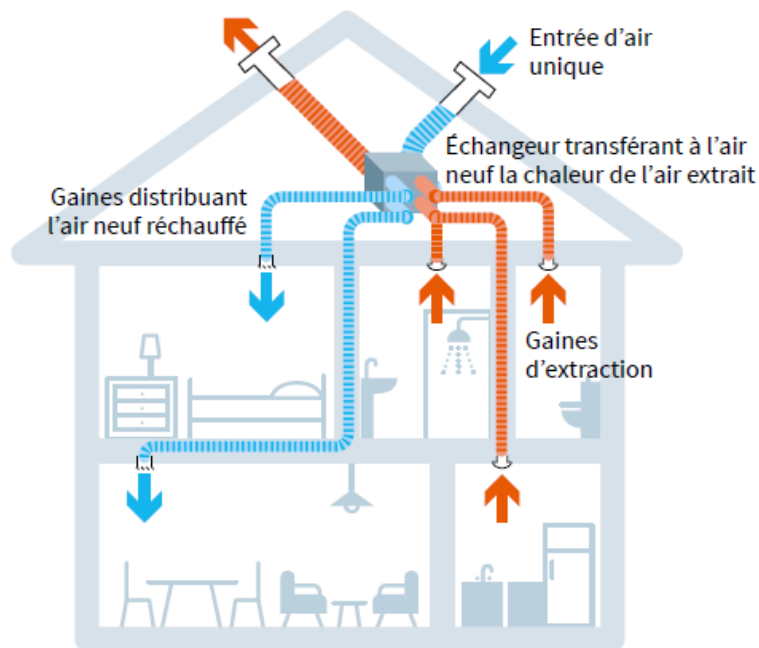


Figure 3:Principe de fonctionnement d'une VMC double flux[18]

A la différence de la VMC simple flux, en présence d'un dispositif de ventilation double flux, l'air extérieur s'introduit dans le logement par le biais d'une buse d'entrée double, comportant entrée et sortie. Par ailleurs, la VMC double flux est munie d'un échangeur thermique qui permet de récupérer jusqu'à plus de 80% des calories de l'air chaud, avant son évacuation. Une fois réchauffé, l'air extérieur est ensuite envoyé dans les pièces du logement, grâce aux différentes bouches d'insufflation installées [8].

Ce dispositif autorise à l'aide d'un échangeur (bloc sous le toit) de recouvrer la chaleur de l'air extrait (en orange) pour la transmettre à l'air soufflé (en bleu puis vert). L'air extrait et l'air soufflé ne se mélangent pas, il n'y a qu'un échange de chaleur. L'air est extrait dans les pièces dites de service : cuisine, salle de bain, WC, cellier... Bref, toutes les

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

pièces disposant d'un point d'eau. L'air est soufflé dans les pièces dites principales : salon, salle à manger, bureau, chambre...etc.[11]

Ici, il existe deux circuits indépendants d'aération. L'un permettant à l'air extérieur d'entrer et d'être réchauffé puis réparti en fonction des besoins de chaque pièce du bâtiment. L'autre permettant l'extraction de l'air comme c'est le cas pour une VMC simple flux. La **VMC double flux** peut également servir de climatiseur, le cas échéant.

6.3.3. La VMC double flux thermodynamique

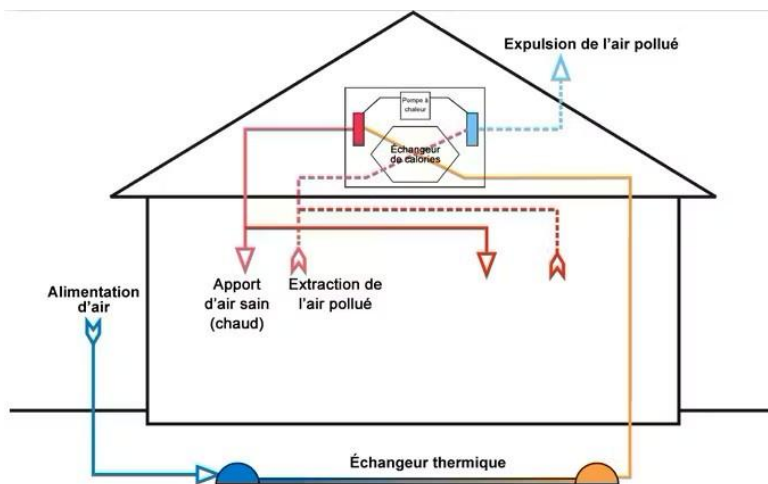


Figure 4:La VMC double flux thermodynamique[19]

Le procédé consiste à associer une VMC double flux à une pompe à chaleur géothermique. Le système d'aération et le système de chauffage sont alors liés, et ce principe réversible (il peut servir de climatisation l'été) peut suffire à chauffer une résidence passive, avec un système de chauffage d'appoint.[9]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

6.3.4. La VMC à gaz

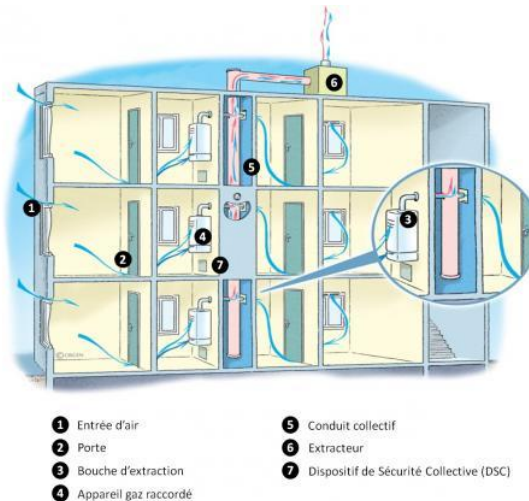


Figure 5:Schéma de fonctionnement d'une VMC avec raccordement au gaz[20]

Il s'agit d'une variante du système C (simple flux) réservée principalement aux logements collectifs. Sa particularité réside dans le fait que le chauffe-eau ou la chaudière à gaz sont raccordés à la VMC. Ainsi, le circuit d'extraction est utilisé pour rejeter les particules et les polluants gazeux résultant de la combustion du gaz. L'installation d'un tel système requiert la mise en place de bouches d'extraction spécifiques. Celles-ci doivent assurer un surcroît du débit d'air lors du fonctionnement des appareils à gaz.[9]

En raison des risques d'incendie, la VMC à gaz est très réglementée. En effet, il est obligatoire d'installer un dispositif de sécurité permettant d'évacuer les gaz de combustion en cas d'arrêt de l'extracteur. Par ailleurs, la réglementation relative à la ventilation dans les bâtiments impose un entretien rigoureux à effectuer par un professionnel. [9]

Il s'agit d'une forme de dérivé de la VMC simple flux classique, avec cette différence particulière ; la VMC gaz permet d'évacuer les **gaz de combustion** issus d'une chaudière par exemple. Ce qui en fait un système apprécié dans certains vieux bâtiments, notamment dans les anciens collectifs.

6.4. La Ventilation Mécanique Répartie ou VMR

La ventilation mécanique répartie ou VMR dispose d'un fonctionnement similaire à celui de la VMC. Ainsi, l'air intérieur est chassé des pièces de vie jusqu'aux pièces de

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

service, à partir desquelles il est évacué vers l'extérieur du logement. A la différence de la VMC, la ventilation mécanique répartie dispose d'aérateurs individuels dans les pièces de service et non pas d'un ensemble d'aérations qui forment un réseau. La mise en place d'une VMR nécessite l'installation d'entrées d'air en haut des fenêtres des pièces principales, afin de faciliter l'arrivée d'air extérieur. Les pièces humides sont, quant à elles, équipées d'aérateurs indépendants, qui aspirent l'air vicié et le rejettent à l'extérieur de l'habitable. Deux types d'aérateurs différents peuvent être installés, à savoir :

- les aérateurs intermittents peuvent être activés de manière ponctuelle (VMP : Ventilation Mécanique Ponctuelle) ;
- les aérateurs permanents fonctionnent en continu, afin d'assurer la ventilation optimale du logement [8]

La VMR convient plus particulièrement en rénovation. Elle fonctionne d'une manière comparable à la VMC. Son principe repose donc sur l'extraction forcée de l'air vicié. Cette opération est réalisée par un aérateur motorisé installé dans chaque pièce de service [2].

Les mouvements de l'aérateur entraînent une légère dépression dans le bâtiment. Ainsi, l'air neuf est aspiré par des entrées d'air placées dans les chambres, selon le phénomène de ventilation par balayage d'air. [9]

On distingue généralement deux types d'aérateurs : permanents et intermittents. Chaque aérateur de VMR coûte en moyenne entre 600 € et 700 €. Cette solution est donc coûteuse malgré sa facilité d'installation (absence de gaine). En outre, elle est moins efficace que la VMC et génère des pertes de chaleur dans le logement. Par ailleurs, elle occasionne un encombrement à la fois physique et esthétique dans les pièces de service.[9]

Basée sur le même principe que la VMC, la VMR a pour particularité d'extraire l'air pièce par pièce, par des aérateurs indépendants, ce qui permet d'éviter le passage de gaines d'aération.[10]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

6.5. VMI : Ventilation Mécanique Inversée ou par insufflation

La ventilation mécanique inversée consiste à insuffler de l'air nouveau dans le logement, ainsi mis en légère surpression. L'air est ensuite filtré puis réchauffé, avant d'être réinjecté dans les pièces de vie. Des bouches de sortie placées dans les pièces humides (salle de bains, cuisine et toilettes), ainsi que des aérateurs installés à hauteur de la traverse haute des fenêtres des pièces à vivre (chambres, salon, etc.), contribuent à évacuer l'air pollué du logement. La VMI se compose de plusieurs éléments, à savoir :

- une entrée d'air sur le toit ;
- un caisson qui comprend un ventilateur, des résistances et un filtre ;
- une ou deux bouches d'entrée d'air au niveau du plafond ;
- de bouches de sortie et d'aérateurs qui facilitent l'évacuation de l'air vicié [8]

Moins répandue que les autres types de ventilation, la VMI fonctionne en sens inverse d'une ventilation mécanique contrôlée. Alors que la VMC expulse l'air vicié, la VMI insuffle de l'air neuf. Le bâtiment est donc mis en surpression.

L'air est aspiré par un caisson d'insufflation. Il est introduit par une entrée placée généralement dans la toiture. Il est ensuite filtré et préchauffé selon des réglages préconfigurés. Mis en surpression, l'air passe par les pièces à pollution, où il est chargé d'humidité et chassé vers l'extérieur [9]

Cette solution de ventilation n'est utile que dans des bâtiments à forte teneur en humidité ou en agents polluants. En effet, son coût d'utilisation est très élevé. En plus d'un prix supérieur à 3 500 €, le préchauffage de l'air augmente la consommation électrique de l'appareil. En outre, la portée de ventilation ne dépasse pas un volume de 400 à 500 m³. Au-delà de ce volume, il est nécessaire de mettre en place plusieurs VMI [9]

D'autre part, le risque de condensation sur les murs intérieurs augmente lorsque les températures à l'extérieur descendent beaucoup. D'ailleurs, la VMI est interdite en Suède et en Finlande pour cette raison. [9]

La VMI a pour objet d'inverser le principe de la VMC. Plutôt que d'aspirer l'air vers l'extérieur pour le renouveler et réguler la température et l'humidité, elle **insuffle**

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

de l'air dans le bâtiment. Au préalable, le système aura préchauffé l'air et l'aura filtré. Ce système de ventilation est recommandé pour les personnes allergiques notamment, car, non content de filtrer l'air, il l'assèche et permet de mieux respirer.

6.6. La ventilation positive hygroréglable (VPH)

Le fonctionnement de la VPH ressemble à celui de la VMI. L'air neuf est aspiré par un moto-ventilateur, puis filtré et purifié. Il est ensuite traité dans un échangeur de chaleur hygro régulé. Cette opération permet de réduire l'hygrométrie en fonction du taux d'humidité intérieur. Si la température extérieure est trop basse, un mécanisme de préchauffage d'air se déclenche [9].

L'air filtré, déshumidifié et préchauffé est insufflé dans les pièces de vie. Cela crée une légère surpression qui force l'évacuation de l'air pollué par des bouches d'extraction placées dans les pièces humides. Globalement, cette solution est plus sophistiquée que la VMI et permet de réduire le risque de condensation. Ceci dit, elle est très onéreuse et présente une portée de ventilation limitée [9].

Cette ventilation mécanique contrôlée a pour principe le réglage du débit de l'air en fonction du taux d'humidité de l'air extérieur. Il peut exister deux types de VMC hygroréglable :

- Dans les VMC hygroréglables de type A, seules les bouches d'extraction sont réglées en fonction de l'humidité,
- Dans les VMC hygroréglables de type B, les ouvertures (ou les entrées d'air) sont elles aussi soumises à régulation hygrométrique.[10]

6.7. La Ventilation Mécanique Ponctuelle ou VMP

La ventilation mécanique ponctuelle se compose d'aérateurs individuels intermittents, qui doivent être installés à proximité de la source de pollution. La VMP, à l'inverse de la VMC, est utilisée ponctuellement et localement. Dans le cas où la mise en place d'un dispositif de ventilation mécanique contrôlée est impossible, la ventilation mécanique

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

contrôlée constitue une bonne alternative. Elle peut par exemple être utile dans une salle de bains ne disposant pas de fenêtre et dont l'aération est donc difficile.

Ce dernier dispositif, qu'on trouve aujourd'hui de moins en moins, a pour principal inconvénient d'être bruyant et sa performance reste moyenne [8]

Comme son nom l'indique, la VMP fonctionne de manière réduite, que ce soit en termes de durée ou d'espace. Elle utilise des aérateurs individuels intermittents placés dans les pièces humides. Chaque aérateur est conçu pour fonctionner de manière intermittente durant le temps d'utilisation de la pièce. Le déclenchement du fonctionnement du dispositif de ventilation se fait :

- En utilisant un système de temporisation.
- De manière combinée avec l'éclairage.
- De façon manuelle.
- Avec un capteur d'humidité.
- Avec un détecteur de présence. [9]

Une fois déclenché, l'aérateur expulse l'air chargé d'humidité ou de polluants vers l'extérieur. Une baisse de pression se crée alors dans la pièce afin de compenser le volume d'air rejeté. C'est ainsi que l'air est renouvelé en utilisant une VMP [9]

Ce type présente des avantages évidents en termes de coût et de simplicité de montage. Néanmoins, il ne permet pas de ventiler l'ensemble de l'habitation. Ses performances sont donc moins bonnes que la VMC [9]

7. Les zones de confort :

7.1. Définition :

Le confort est une notion globale: Chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure, prestige.... et autre, sont autant d'éléments définissant plusieurs paramètres climatiques, esthétiques, psychologiques du confort. Le confort est également la sensation subjective qui n'existe pas en lui-même.[21]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

7.2. Le confort respiratoire :

La bonne qualité d'air intérieur traduit par la ventilation est importante pour les processus métaboliques et pour l'hygiène de chacun. La ventilation et la réduction des pollutions à la source sont les garantes d'une meilleure respiration et d'une meilleure santé l'indicateur de la qualité de l'air est donné dans certaines études par la concentration en dioxyde de carbone [9].

Il a été établi une plage de concentrations de dioxyde de carbone correspondant à une qualité d'air acceptable. Le dioxyde de carbone est produit par la respiration humaine, et sa concentration ne peut être réduite de façon significative que par une ventilation naturelle, ou artificielle suffisante. Le degré de ventilation nécessaire pour maintenir une faible teneur en dioxyde de carbone à l'intérieur permet également de réduire les concentrations d'autres polluants intérieurs et d'améliorer la qualité générale de l'air à l'intérieur. [22]

7.3. Le confort thermique :

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement.[23]

Le confort thermique est représenté par la sensation de bien-être du corps en lien avec son environnement thermique. Le confort se matérialise donc par un équilibre entre le lieu environnant et l'être humain. Il est vrai que pour maintenir ce confort, des échanges thermiques doivent s'effectuer entre l'homme et l'environnement ambiant.

Ces échanges thermiques s'effectuent à :

- 35 % par convection, c'est-à-dire qu'un transfert de chaleur s'effectue entre l'air environnant et le corps. La convection est établie sur le principe de l'air chaud qui monte et de l'air froid qui descend.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- 35 % par rayonnement. Le rayonnement a lieu entre les parois et le corps.
- 24 % par évaporation de type transpiration ou respiration. Les calories sont assimilées lors du passage de l'état liquide à gazeux de l'eau.
- 6 % par absorption de nourriture.
- et 1 % par conduction, c'est-à-dire par contact instantané avec une surface.

7.4. Paramètres définissant la zone de confort :

Le confort thermique est défini selon les caractéristiques qui sont les suivantes :

- la *température ambiante de l'air* notée T_a . Ces températures de la zone de confort doivent être préservées à 19 °C en période hivernale et 26 °C l'été. De plus, ces températures se doivent d'être proportionnées au sein d'un même espace mais aussi entre 2 pièces différentes.
- la température moyenne des parois notée T_p . Il faut savoir que plus une paroi est froide en comparaison à la température de l'air ambiant et plus la température ressentie sera faible provoquant ainsi une sensation de froid. A l'inverse, lorsqu'une paroi est chaude, la température ressentie est plus élevée, ce qui engendre une sensation de chaleur. Plus la différence de température est importante entre la paroi et l'air ambiant, plus cela provoquera une sensation d'inconfort.
- l'humidité relative de l'air notée HR se traduit par le rapport entre la quantité d'eau présente au sein de l'air de la température ambiante et la quantité maximale d'eau pouvant être renfermée à température équivalente. Lorsque l'humidité relative se situe entre 30 et 75 %, aucune difficulté n'est à prévoir. Des températures de l'ordre de 24 à 25 °C couplées à une forte humidité relative (supérieure à 75 ou 80 %) engendrent une sensation de lourdeur et de moiteur de l'air ambiant, c'est-à-dire que le corps et plus particulièrement la peau n'arrive plus à évacuer l'eau issue de la transpiration. Le rafraîchissement ne peut donc se faire.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- **la vitesse de l'air** : elle impacte les échanges de chaleur. Si la vitesse de l'air intérieur est supérieure à 0.2 m/s et que les températures sont faibles, cela peut impacter de façon considérable la sensation de confort thermique de l'occupant.
- **l'habillement** : il offre une résistance thermique face aux interactions ayant lieu entre l'environnement et la peau. Cet habillement est mesuré par le clo, qui est l'unité permettant de mesurer l'habillement selon différents degrés. 0 clo étant sans habillement, 0.5, une tenue légère d'été et 1.5, une tenue de ville standard.
- **le métabolisme** : il correspond à la production de chaleur par le corps humain ce qui permet le maintien de ce dernier à une température effective aux alentours de 36,7 °C. Le métabolisme varie en fonction de l'activité du corps. Pour un repos assis par exemple, le métabolisme est de 1 met ou 58 W/m² (met = unité du métabolisme, aussi appelée W/m²), de 2 met soit 115 W/m² pour un poste de travail debout sur machine et 3 met ou 175 W/m² pour un effort soutenu.
 - **l'activité** : selon l'activité de chacun, les températures de confort ne seront pas les mêmes. L'activité agit directement sur les échanges thermiques. Il est ainsi conseillé pour une personne ayant une activité intensive, une température comprise entre 15 et 16 °C, 18 °C pour une personne exerçant un poste debout nécessitant peu d'activité. Quant à une personne étant assise, une température comprise entre 21 et 23 °C est plutôt recommandée.

Il faut savoir que si la vitesse de l'air n'excède pas 0,2 m/s, ce qui est en majeure partie le cas d'un logement ou d'un bâtiment, il est possible de déterminer une température dite de confort, aussi trouvée sous l'appellation de température opérative pouvant être définie par le calcul suivant :

- température de confort = (température de l'air + température des parois) / 2

Même si des paramètres définissent la zone de confort, le confort est aussi déterminé par des critères plus subjectifs variant d'une personne à une autre. Ces facteurs d'ordre physiologique sont les suivants :

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- le sexe ;
- l'âge ;
- l'état de santé ;
- la perception de chacun ;
- les différences culturelles.

Ces caractéristiques font donc que la sensation de confort est ressentie différemment d'un individu à l'autre.

7.5. Diagramme de l'ASHRAE et détermination d'une zone de confort :

Il n'est que peu probable de pouvoir établir une température de confort pouvant correspondre à chaque individu. Comme vu précédemment, des facteurs sont à prendre en compte dans la détermination de cette sensation de confort.

Les personnes se trouvant en situation de repos sont plus sensibles aux variations de températures et nécessitent des températures plus élevées afin de se trouver dans la zone de confort.

A contrario, les personnes étant en situation d'activité intense et nécessitant une évacuation de chaleur importante auront une zone de confort se situant à de plus faibles températures.

Pour une zone de confort optimale, une température de 22 °C est attendue, pour une humidité relative comprise entre 40 et 65 %. L'homme possède une faculté d'autorégulation. Cette dernière permet de constituer une zone de confort, c'est-à-dire une zone où la variation de perception de confort est faible.

Cette zone de confort en matière de génie climatique est représentée sur le graphique de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers), qui est une société internationale spécialisée dans le domaine du génie thermique et climatique.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Sur ce graphique, sont donc représentées les températures en fonction de l'humidité relative.

Il faut savoir qu'à température et pression données, l'eau se matérialise sous la forme de vapeur dans l'air. Dès lors où les températures augmentent, il en est de même pour la quantité de vapeur.

Un indicateur, regroupant les paramètres définissant la zone de confort, cités plus haut dans l'article, permet de mesurer cette zone dite enthalpique. Les conditions de confort ne sont pas les mêmes selon la situation à laquelle on fait face. Cet indicateur est donc le vote moyen prévisible noté PVM (Predicted Mean Vote).

Cet indice repose sur un vote concernant la sensation de confort réalisé par de nombreuses personnes. Suite à cela, une graduation permet de classer les valeurs de PVM selon l'échelle suivante :

- -3 : froid
- -2 : frais
- -1 : légèrement frais
- 0 : neutre, la sensation de confort est optimale
- +1 : légèrement tiède
- +2 : tiède
- +3 : chaud

Les graduation positives se traduisent par une température supérieure à la température idéale tandis que les graduations négatives représentent une température inférieure à celle considérée comme idéale.

La zone de confort se situe entre les valeurs -1 à +1. []

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Dans le confort global ressenti, il faut entendre bien-être de l'individu dans le bâtiment, dans son habitation, son lieu de travail et autres. C'est bien le travail collectif de l'architecte et de l'ingénieur de concevoir des lieux confortables au sens large du terme.

Cependant, avoir la bonne température en hiver, la bonne température en été, ne suffit plus. L'air que l'on respire participe de plus en plus au confort de vie et impacte de plus en plus notre santé. La crise du Covid 19 a démontré l'importance de la qualité du confort qui est plus complexe que prévu s'il doit affronter des crises climatiques et désormais sanitaires : dimensions des espaces, confort d'un lieu de travail au domicile, mobilité douce, ...

Le confort physiologique est un premier pas auquel s'attache cette chronique. D'autres éléments comme l'acoustique et la luminosité naturelle et artificielle, sont tout aussi prépondérants et seront analysés dans une prochaine chronique que je promets de réaliser.

En attendant, bonne lecture sur **les facteurs de confort que sont la température, l'humidité et la qualité de l'air !**

7.6. Le confort thermique :

Les 6 paramètres qui déterminent le confort thermique :

Le confort n'est pas subjectif, il est fonction de plusieurs paramètres physiques

1. Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de $36,7^{\circ}\text{C}$.
2. L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
3. La température ambiante de l'air T_a .
4. La température moyenne des parois T_p .

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

5. L'humidité relative de l'air (HR en %), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.
6. La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s pour une sensation de confort.

7.6.1. La température et le confort ressenti :

La température de confort ressenti appelée aussi "**température opérative**" ou "**température résultante sèche**" :

$$T^{\circ}\text{opérative} = (T^{\circ}\text{air} + T^{\circ}\text{parois}) / 2$$

- Cette relation simple s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.
- Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de 36,7°C.
- Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

7.6.2. La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon les mécanismes :

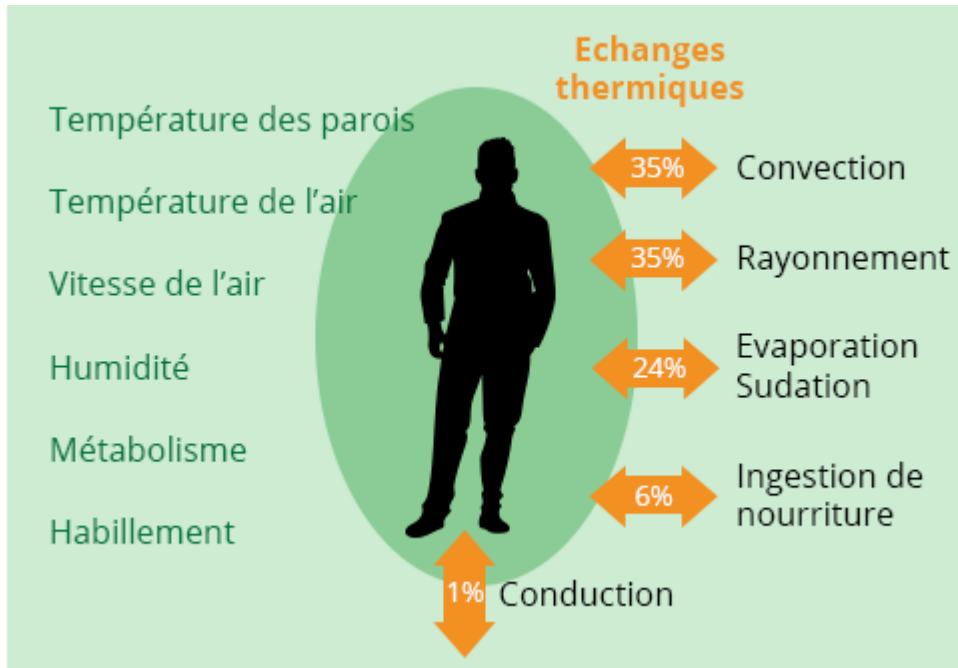


Figure 6:Répartition des échanges thermiques du corps humain

- Plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain se font par **convection avec l'air ambiant** (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau).
- Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35% du bilan alors que les pertes par contact (**conduction**) sont négligeables (< 1 %).

Nos **échanges par rayonnement** sont prépondérants, 35%, ce qui explique qu'il faudra agir sur l'isolation pour éviter les parois froides en hiver et les sols et parois chaudes en été.

7.7. L'impact de l'humidité relative dans un bâtiment :

L'inconfort n'apparaît que lorsque $30\% < \text{Humidité relative} < 70\%$

De **faibles niveaux d'humidité** (en deçà de 30%) donnent lieu à certains problèmes : augmentation de l'électricité statique (petites décharges lors du contact avec des objets

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

métalliques), gêne et irritation accrue à la fumée de tabac (du fait d'un abaissement du seuil de perception des odeurs).

De hauts niveaux d'humidité (au-delà 70%) donnent lieu à une croissance microbienne importante et à des condensations sur les surfaces froides.

C'est ce qu'indique le diagramme ci-dessous, précisant la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique (d'après Scofield et Sterling – Doc.Dri-Stroom/Pacare).

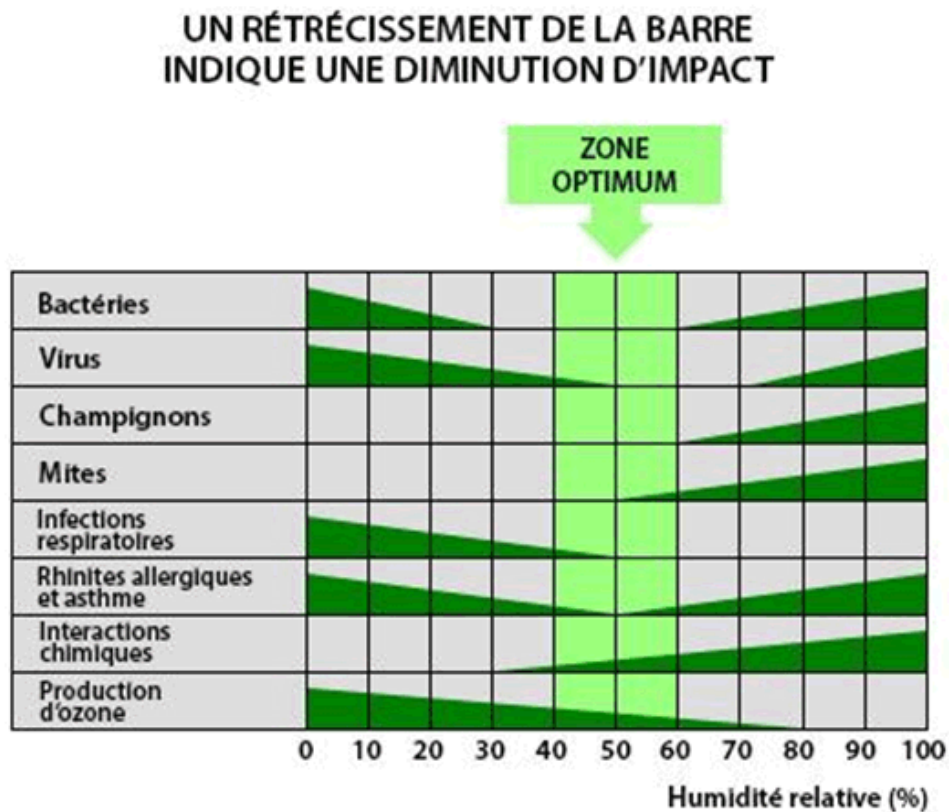


Figure 7: La plage de confort température-humidité

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut dès lors recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65%.

Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant (extrait de l'article de R. Fauconnier – L'action de l'humidité de

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires – parut dans le numéro 10/1992 de la revue Chauffage Ventilation Conditionnement).

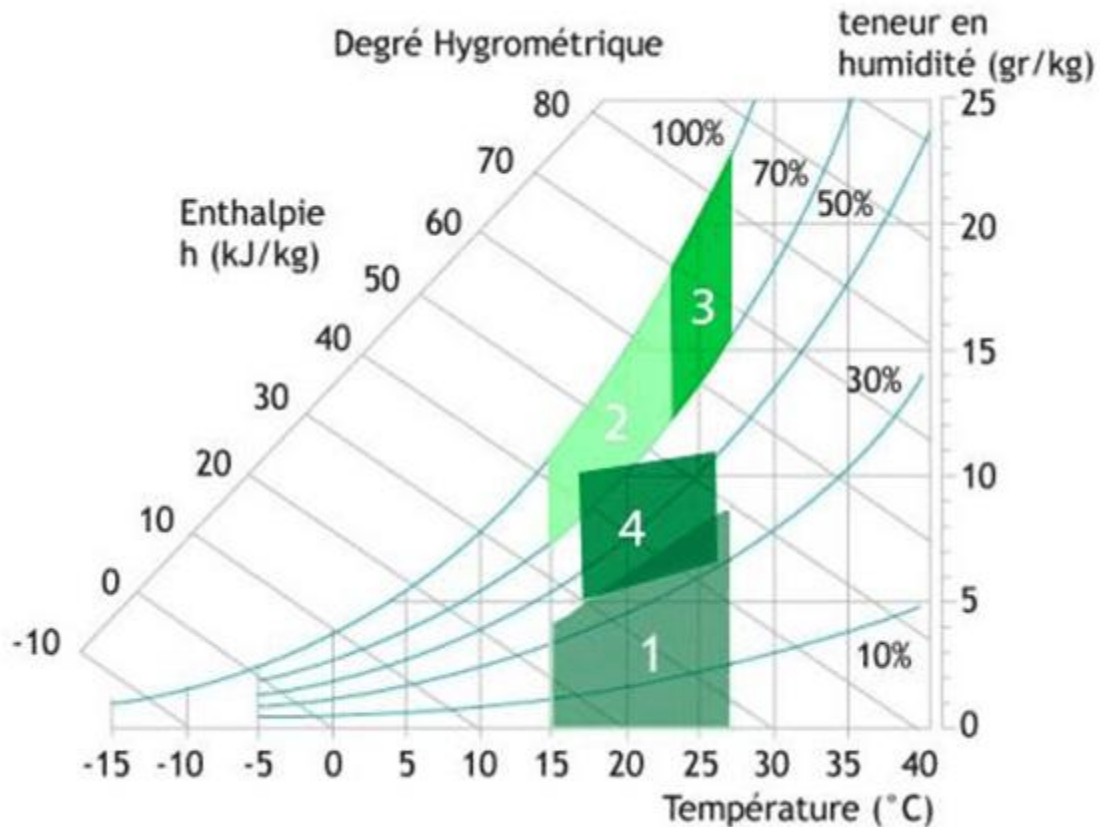


Figure 8:Diagramme Psychrométrique

1. Zone 1 : zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
2. Zones 2 et 3 : zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
3. Zone 3 : zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4. Zone 4 : polygone de confort hygrothermique.

7.7.1. Confort et vitesse de l'air :

- Confort et vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération, car elle influence

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

- À l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.
- Le mouvement de l'air abaisse la température du corps, facteur recherché en été, mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air).
- Conditions estivales :

Pour les températures de locaux comprises entre 21 et 24°C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités.

Mais lorsqu'on fournit un travail musculaire dans des endroits chauds, des vitesses d'air de 1,25 à 2,5 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement.

Voici les valeurs extraites du Guide pratique de ventilation - Woods, valables pour des conditions moyennes d'humidité et d'habillement :

Vitesse de l'air [m/s]	Refroidissement équivalent [°C]
0,1	0
0,3	1
0,7	2
1,0	3
1,6	4
2,2	5
3,0	6

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Vitesse de l'air [m/s]	Refroidissement équivalent [°C]
4,5	7
6,5	8

Tableau 1: la vitesse de l'air et du refroidissement équivalent

7.7.2. Le confort thermique est variable en fonction des individus

- Au-delà des 6 paramètres présentés paragraphe précédent, la zone de confort étant déterminée, la sensation de confort peut aussi être influencée par d'autres éléments comme l'état de santé, l'âge ou l'état psychologique de l'individu.
- Ainsi, la possibilité d'une intervention personnelle sur les caractéristiques de l'ambiance de son lieu d'activité est importante si on veut éviter tout sentiment de frustration ou d'enfermement et donc d'inconfort.
- En fait, les zones de confort sont susceptibles de varier selon, le contexte et le niveau de qualité de construction, de la capacité d'action de l'occupant comme en fonction de la température extérieure.
- Voici en fonction de différentes catégories d'individus et de leurs activités, en fonction de la température extérieure, les températures de confort optimales.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

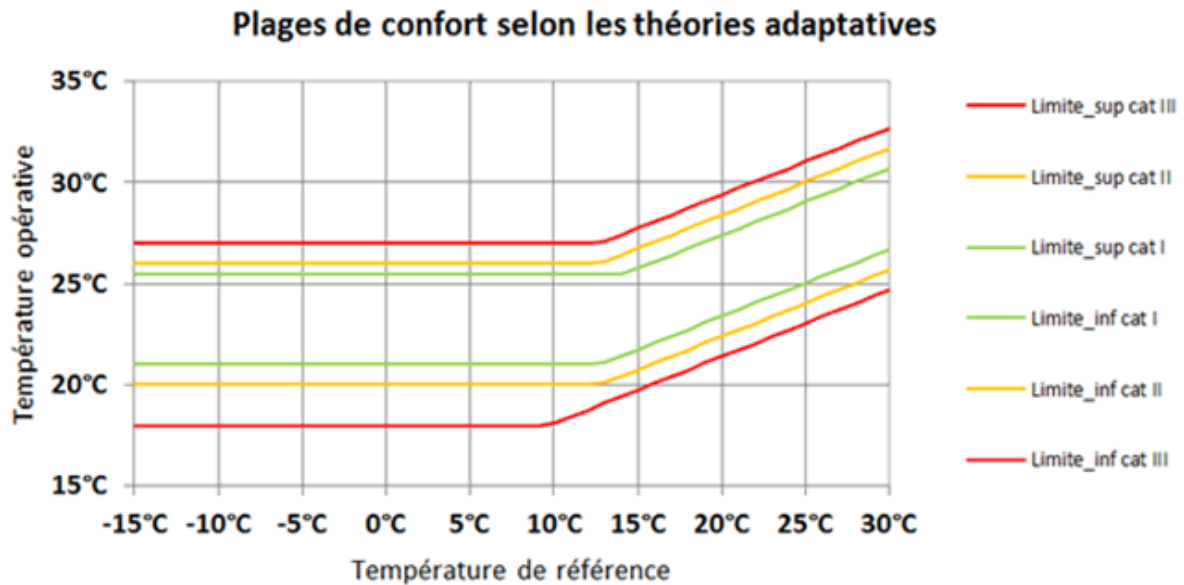


Figure 9:Températures opératives correspondantes aux différentes plages de confort définies par la norme NBN EN 15251

7.8. Confort avec la qualité de l'air intérieur :

7.8.1. La ventilation : confort sanitaire et santé :

L'**aération des bâtiments** doit satisfaire à de multiples exigences, de confort physiologique et acoustique, de sécurité, d'économie d'énergie et de respect de l'environnement.

La **ventilation** et la **qualité d'air intérieur** (QAI) contribue largement au confort ressenti par les individus. Les conditions d'aération à l'intérieur d'un espace clos sont parmi les principaux facteurs déterminants de l'hygiène de l'homme, de son confort et de son bien-être.

Elles ont un effet direct sur l'individu par la **qualité de l'air respiré** et un effet indirect par leur influence sur la **température de l'air intérieur et des parois**, ainsi que sur le **taux d'humidité de l'air intérieur**.

La ventilation au sens du renouvellement d'air contribue aux trois fonctions essentielles que sont le **maintien de la qualité de l'air** (confort olfactif et sanitaire/santé),

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

le **maintien d'un confort thermique d'été** (protection et bien-être) et la **préservation du bâti** (contre les moisissures et dégradations).

Rappel des débits d'air extrait minimum des logements

Type de logement	Total mini (m ³ /h)	Cuisine mini (m ³ /h)	Cuisine Pointe (m ³ /h)	Bain (m ³ /h)	Autre Salle d'eau (m ³ /h)	WC (m ³ /h)	
T1	35	20	75	15	15	15	15
T2	60	30	90	15	15	15	15
T3	75	45	105	30	15	15	15
T4	90	45	120	30	15	30	15
T5	105	45	135	30	15	30	15
T6	120	45	135	30	15	30	15
T7	135	45	135	30	15	30	15

Tableau 2:Débits d'air minimaux recommandés par type de logement

7.8.1.1. Définition du confort thermique dans un bâtiment :

Le confort thermique dans un bâtiment se définit comme une **sensation de bien-être** ressentie par les occupants en fonction de leur environnement intérieur. Il est étroitement lié à l'équilibre entre la température interne du corps humain et la **température ambiante du logement**. Elle peut être influencée par plusieurs facteurs tels que la température de l'air, l'humidité, la qualité de l'air, les mouvements d'air et la température des parois.

Atteindre un confort thermique optimal est un enjeu majeur qui contribue à **minimiser la consommation d'énergie** tout en assurant une température intérieure **agréable et**

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

constante. Cela implique l'application de diverses techniques et principes de construction.

De plus, il faut noter que le confort thermique n'est pas statique. Sa perception est subjective et varie d'un individu à l'autre, étant influencée par plusieurs facteurs.

- **L'habillement** : la quantité et le type de vêtements portés jouent un rôle crucial dans le ressenti de la température.
- **Le métabolisme** : la production de chaleur interne au corps humain influe sur notre sensation thermique.
- **L'activité physique** : selon l'intensité de l'exercice, la perception de la chaleur peut varier.

7.8.1.2. La température ambiante dans la maison :

Qu'est-ce que la température confort ?

Notion très connue par chacun d'entre nous, la température ambiante dans votre maison a une très grande influence sur votre **confort thermique**. Elle dépend de facteurs tels que la qualité de votre isolation, votre système de chauffage et les réglages de votre thermostat. D'une part, une température trop faible peut rendre l'environnement inconfortable, tandis qu'une température trop élevée peut entraîner une surconsommation d'énergie.

- En hiver, il est recommandé de maintenir une température ambiante d'environ **18°C**, ou jusqu'à 22°C si vous avez un nourrisson.
- En général, une température de confort se situe entre **19°C et 20°C**.

Chaque degré supplémentaire peut augmenter votre consommation d'énergie de **7%**. En outre, il est judicieux de baisser la température de **2 à 3°C la nuit** ou lorsque la maison est inoccupée pour économiser de l'énergie.

La température des parois du logement

La température des parois du logement, que celles-ci soient opaques ou transparentes, joue un rôle déterminant dans la **température ressentie**. En effet, un mur ou une fenêtre

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

froide peut induire une sensation d'inconfort même si la température ambiante est agréable. Les sols et les plafonds sont aussi à prendre en compte.

Exemple de l'influence des parois sur la température ressentie:

- Si vous réglez votre thermostat à 21°C et que vos parois ne s'élèvent qu'à 15°C, vous aurez un **ressenti de 18°C**.
- À l'inverse, dans une pièce bien isolée avec une température des parois à 20°C, la température **ressentie sera de 20,5°C**.

Pour améliorer la température des parois, une isolation efficace est essentielle. Réduire au maximum les ponts thermiques et installer des vitrages performants sont des mesures cruciales. Le choix des matériaux de paroi est aussi déterminant du fait de **l'effusivité et de la diffusivité** qui les caractérisent.

Précision sur l'effusivité et la diffusivité des matériaux

L'effusivité et la diffusivité thermique des matériaux ont un **impact majeur sur le confort** thermique.

A savoir: La sensation de froid est provoqué par les calories qui quittent le corps humain. Que se soit par contact avec une surface ou dans l'air ambiant. Exemple avec un pied sur un carrelage froid, les calories migrent du pied vers le carrelage, provoquant l'effet de froid.

L'effusivité d'un matériau définit sa **capacité à absorber ou à libérer** des calories. À noter que l'effusivité ne peut en aucun cas se substituer à la qualité de l'isolation. Elle a cependant un rôle sur la gestion des températures intérieures en absorbant les afflux de calories.

Exemple: La haute effusivité d'une brique de terre crue lui permet de capter un maximum de calories. Et de les restituer avec la même capacité.

La diffusivité caractérise la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température d'un point à un autre. Elle détermine **la vitesse à laquelle la chaleur se**

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

propage à travers le matériau. Elle est liée à la conductivité thermique du matériau et à sa capacité à stocker la chaleur.

Exemple: La faible diffusivité d'une brique de terre crue lui permet de diffuser lentement la chaleur qu'elle a emmagasiné.

En résumé, l'effusivité et la diffusivité des matériaux contribuent à la régulation thermique d'un bâtiment. Choisir des matériaux avec une **bonne effusivité** et une **faible diffusivité** peut améliorer le confort thermique: terre crue, terre cuite, chaux chanvre...

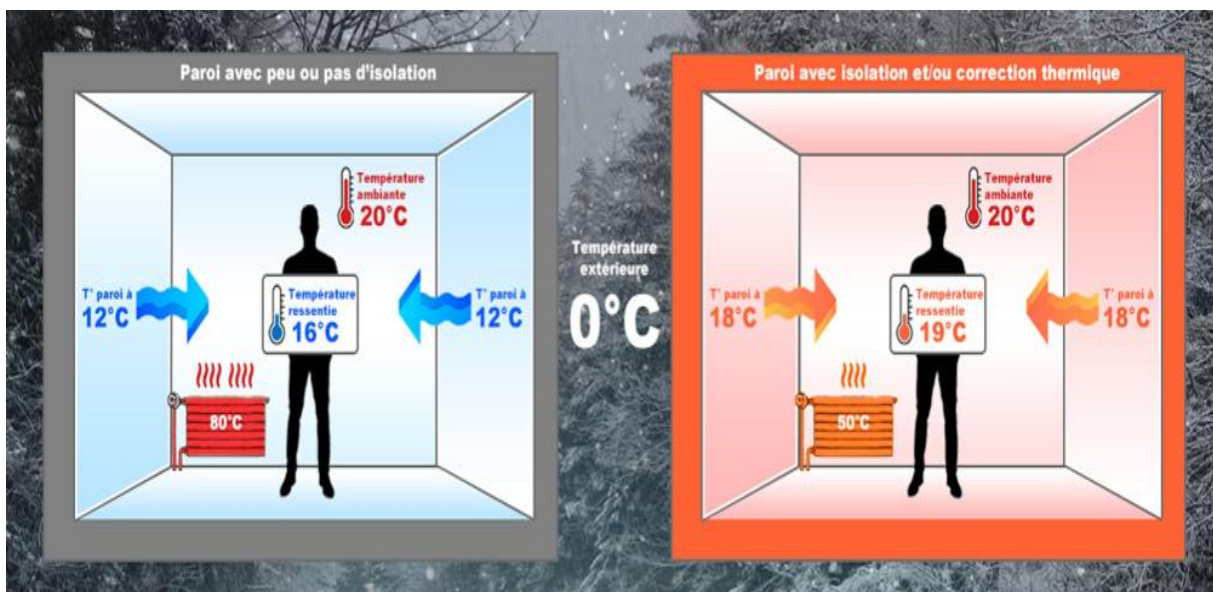


Figure 10: Comparaison de l'impact de l'isolation thermique sur le confort intérieur

7.8.1.3. Le choix du mode de chauffage du bâtiment :

Le choix du mode de chauffage est très important pour la recherche du confort thermique optimal. Deux approches principales, la convection et le rayonnement, présentent des caractéristiques distinctes qui méritent d'être explorées.

Le chauffage par convection

Le chauffage par convection repose sur le principe de la circulation de l'air chaud dans une pièce. L'air, réchauffé par une résistance électrique, monte et diffuse la chaleur dans l'espace. Ce mode de chauffage a l'avantage de monter rapidement en température, offrant ainsi une sensation de chaleur immédiate.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Cependant, le chauffage par convection a aussi ses limites.

- Une **stratification de la chaleur** se produit car l'air chaud monte, avec une température plus élevée en haut de la pièce qu'en bas. Ceci peut entraîner une sensation de "pieds froids".
- Des **mouvements d'air** sont créés par le convecteur, créant ainsi un courant d'air qui diminue le confort et donne envie de chauffer plus.
- Le brassage de l'air peut favoriser la **circulation de poussières** et d'allergènes.
- Les convecteurs montent beaucoup en température. Il peuvent poser un **problème de sécurité** vis à vis des enfants.
- Le chauffage par convection **assèche l'air**.

Chauffage par rayonnement

Le chauffage avec des panneaux rayonnants offre une sensation de chaleur plus naturelle. Il chauffe les surfaces et les objets avec les ondes infrarouges. Il est comparable à la sensation de chaleur du soleil. Ce mode de chauffage a plusieurs avantages :

- Une distribution de chaleur homogène et stable, limitant les courants d'air et les variations de température.
- Une chaleur ressentie plus rapidement, même si la température ambiante est relativement basse.
- Un meilleur confort thermique, avec une réduction de la perte de chaleur corporelle par rayonnement.

Divers systèmes utilisent le principe du rayonnement, parmi lesquels :

- Les planchers chauffants, qui offrent un confort exceptionnel, mais nécessitent un temps de réaction plus long du fait de l'inertie du sol.
- Les poêles de masse, qui restituent la chaleur lentement et régulièrement.
- Les radiateurs électriques à inertie, qui stockent la chaleur avant de la diffuser par rayonnement.
- Les radiateurs à eau, qui diffusent la chaleur par rayonnement et convection.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Il est à noter que certains systèmes, comme les radiateurs infrarouges, peuvent assécher l'air ambiant.

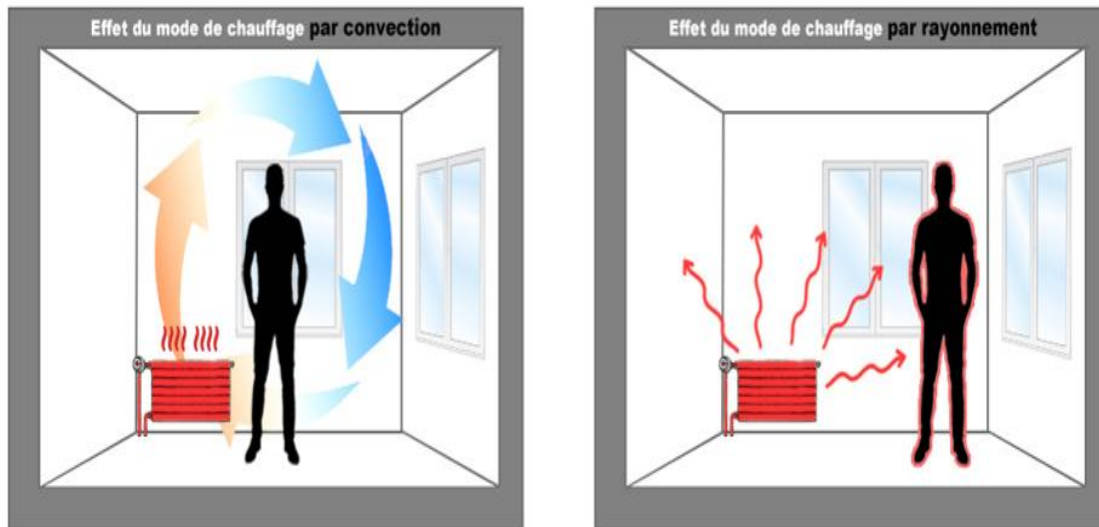


Figure 11: Comparaison des effets du mode de chauffage par convection et par rayonnement

7.8.1.4. Limiter les variations de températures :

A. La température de consigne

Un aspect essentiel du confort thermique réside dans la **gestion des variations** de température. Ces fluctuations influent sur le bien-être des occupants. Le confort thermique est souvent optimal lorsque **l'amplitude des températures est faible**. Une amplitude de 1°C est généralement considérée comme acceptable. Par exemple, si la **température de consigne** est fixée à 20°C, le système de chauffage devrait maintenir une plage de fonctionnement entre 19.5°C et 20.5°C.

B. Régulation de la Température

Une régulation de la température bien dimensionnée améliore le confort thermique. Elle permet **d'ajuster la température** de l'habitat en fonction des besoins spécifiques des occupants et des variations climatiques.

Pour une régulation efficace, plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- **Le thermostat** : Il permet de régler la température de consigne et d'automatiser le fonctionnement du système de chauffage.
- **Les robinets thermostatiques** : Installés sur les radiateurs, ils permettent de réguler la température pièce par pièce.
- **Les systèmes de régulation avancés** : Ils intègrent des fonctionnalités plus complexes comme la programmation horaire, la détection de présence ou la gestion à distance via une application mobile.

C. Limiter les apports solaires en été

En été, les apports solaires peuvent être à l'origine d'une **surchauffe de l'habitat**, altérant ainsi le confort thermique. Il faut savoir que les rayons solaires au travers d'un vitrage peuvent générer autant de chaleur qu'un radiateur de **200W/m²**. Une sous toiture non isolée peut monter à 90° sans problème en plein après midi. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies pour limiter ces apports. Plusieurs solutions peuvent être envisagées.

- **Isoler avec des isolants denses** : Les isolants denses favorisent le déphasage de l'isolation. C'est le temps nécessaire pour que la chaleur pénètre dans le bâtiment.
- **Utilisation de protections solaires** : Des protections solaires fixes ou mobiles (volets, stores, casquettes de toit) peuvent être installées pour bloquer directement les rayons du soleil.
- **Réfléchir le rayonnement solaire** : Les couleurs claires sur les toits et les murs exposés au soleil peuvent réfléchir une grande quantité de chaleur solaire. Une peinture anti chaleur aide à limiter l'augmentation de la température à l'intérieur.
- **L'exploitation de la végétation** : L'utilisation de systèmes passifs tels que la végétation peut aider à contrôler le rayonnement solaire. Par exemple, un arbre devant votre baie vitrée plein sud, peut fournir une ombre naturelle et contribuer à la régulation thermique.
- **Ventilation naturelle** : Favoriser la ventilation naturelle la nuit pour aider à évacuer la chaleur accumulée à l'intérieur de l'habitat.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

D. Travailler l'inertie de l'habitation

L'inertie thermique permet de maintenir une **température stable** à l'intérieur du bâtiment. Associée à une bonne isolation de l'habitat, elle améliore le **confort d'été** en l'absence de climatisation. L'inertie thermique peut se travailler notamment grâce à l'emploi de **matériaux denses** adéquats lors de la construction ou de la rénovation de l'habitat.

Les matériaux denses comme la pierre, le béton, la terre cuite sont particulièrement efficaces pour emmagasiner la chaleur ou la fraîcheur et la restituer lentement et de manière diffuse dans l'habitation. Il est possible de travailler l'inertie de l'habitation en adaptant la gestion des ouvrants. Une bonne gestion des ouvertures permet en effet de maîtriser les apports de chaleur et de fraîcheur externes en fonction des besoins.

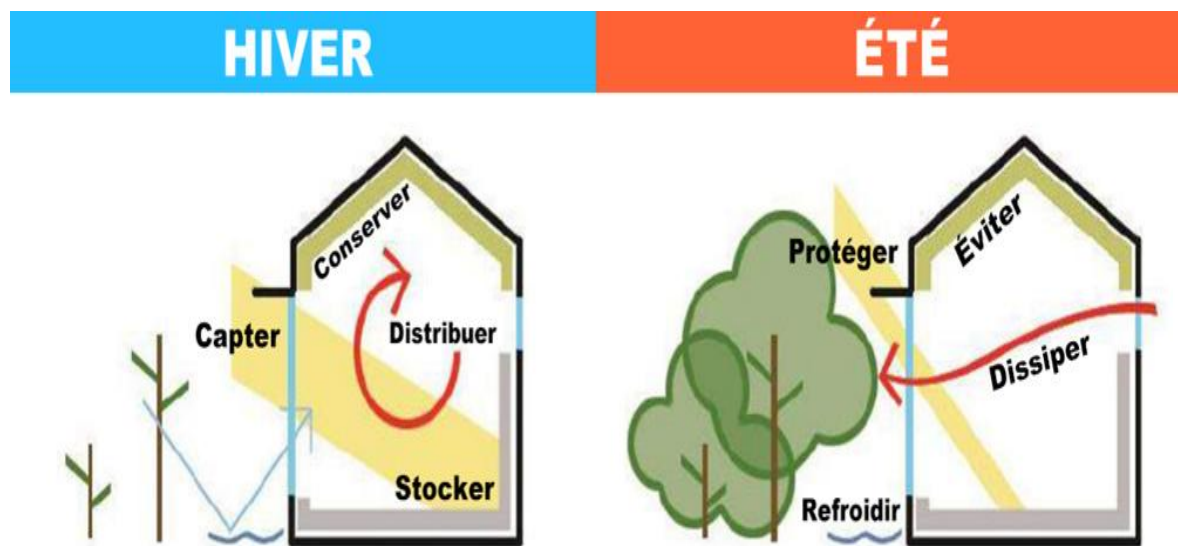


Figure 12:Stratégies saisonnières de gestion énergétique pour un bâtiment

7.8.1.5. Distribuer la chaleur dans les zones de vie

La distribution de la chaleur améliore le confort thermique d'un habitat. Une **répartition homogène** de la chaleur entre les différentes pièces contribue à améliorer l'expérience thermique des occupants.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Pour atteindre une température uniforme, il est recommandé d'avoir plusieurs **émetteurs de chaleur répartis** dans l'ensemble de l'espace plutôt qu'un seul point de chauffage central. L'utilisation de plusieurs radiateurs, par exemple, permet d'assurer une **distribution équilibrée de la chaleur**. Installez des thermostats pour contrôler la température dans chaque pièce et équipez les émetteurs de chaleur (radiateurs ou autres) d'un robinet thermostatique

Dans le cas d'un unique point chaud, comme un **poêle à bois ou à granulés**, les variations de température peuvent être plus marquées. Il peut être plus difficile d'obtenir une température constante dans toutes les zones. Dans ce cas, vous pouvez envisager d'installer un système de récupération et de distribution de chaleur. Chaque maison est unique, la mise en place d'une solution de distribution de chaleur doit être adaptée à chaque situation particulière.

7.8.1.6. Gérer l'humidité relative de l'air ambiant

Les effets de l'humidité dans une maison

Un **taux d'humidité correct** améliore le confort et permet de **diminuer la température de consigne** sans sacrifier le confort. De plus il évite les désagréments liés à une atmosphère trop sèche, tels que la sensation de peau sèche, d'irritations des voies respiratoires et le craquèlement du mobilier en bois.

Un **excès d'humidité** peut favoriser la croissance de moisissures et causer une sensation de froid. A terme, ce trop plein d'humidité va migrer dans les parois et **détériorer l'isolation** de l'habitat.

C'est quoi le confort hygrothermique ?

Le confort hygrothermique concerne la **sensation ressentie** par un individu en fonction de la température et de l'humidité ambiantes. Cette sensation idéale est maintenue lorsque la température reste constante entre **18 et 20°C**, le taux d'humidité oscille entre **40 à 60%**, et enfin, que la différence de température, entre l'air intérieur et les parois, ne dépasse pas **3°C**.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

L'hygro thermie prend aussi en compte le mouvement de l'air, la température de l'air et des surfaces environnantes. Ce confort dépend de plusieurs facteurs:

- **L'isolation du bâtiment** qui permet de se préserver du froid ou de la chaleur extérieure mais aussi (si cela est bien fait) de gérer l'humidité intérieure.
- **Le système de chauffage** qui doit garantir une température ambiante stable pour un confort optimal.
- **La ventilation** qui favorise la circulation de l'air pour éviter une atmosphère trop sèche ou trop humide. La ventilation naturelle évidemment, mais aussi les VMC (ventilation mécanique Contrôlée) simple ou double flux.

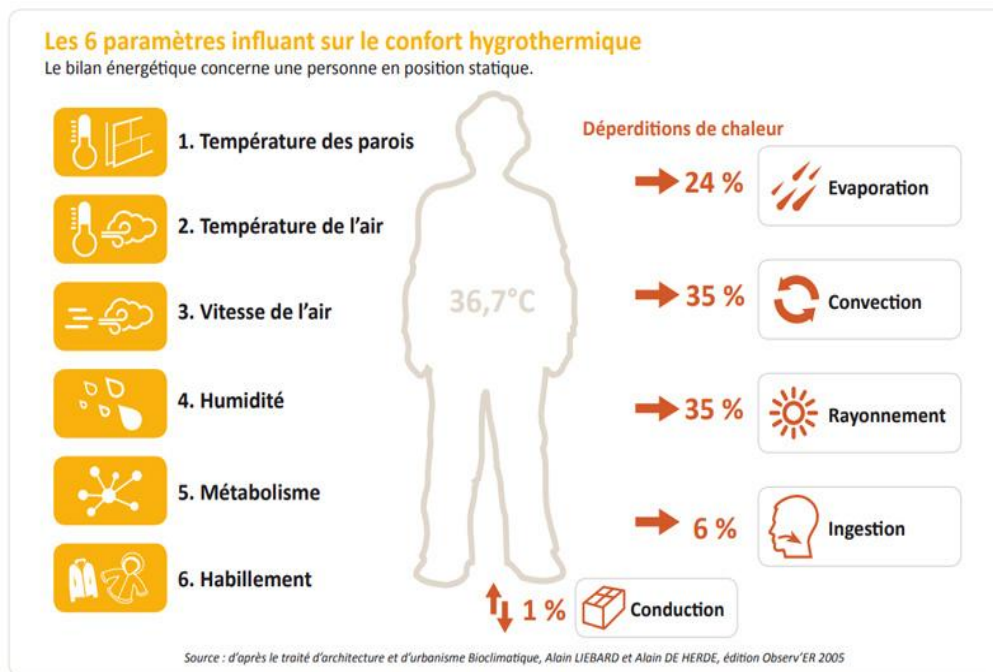


Figure 13: Les 6 paramètres qui influencent le confort hygrothermique

Ainsi, l'hygro thermie est essentielle pour garantir le bien-être des occupants, mais aussi pour la santé et la durabilité du bâtiment

7.8.1.7. Maitriser les mouvements de l'air dans la maison

Les courants d'air dans une pièce vont donner un **inconfort certain**. L'homme peut ressentir un mouvement d'air à partir d'une vitesse d'air de **0.2m/s**. Celui-ci fera baisser la température ressentie dans la pièce. Les courants d'air peuvent avoir plusieurs origines:

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- **La convection naturelle** : C'est le mouvement de l'air causé par les différences de température à l'intérieur de l'habitat. Certains dispositifs, comme les convecteurs, peuvent renforcer les courants d'air.
- **Les infiltrations d'air** : Elles sont généralement dues à des défauts d'isolation ou les défauts d'étanchéité des parois. Ces infiltrations peuvent entraîner une sensation d'inconfort et augmenter la consommation énergétique.
- **La ventilation** : Un système de ventilation est essentiel pour assurer le renouvellement de l'air et éviter l'accumulation d'humidité. Mais celle ci doit être de qualité et bien dimensionnée pour maintenir une vitesse de l'air assez faible tout en assurant une qualité d'air optimale.

7.8.1.8. Usages et habitudes de l'occupant

Les usages et habitudes de l'occupant jouent un rôle essentiel dans le confort thermique. L'activité physique, la tenue vestimentaire ou encore les habitudes d'ouverture des fenêtres peuvent en effet influencer la perception de la température ambiante.

- **Activité physique** : Plus l'activité est soutenue, plus la température de consigne pourra être réduite. En effet, le corps produit de la chaleur lors d'une activité physique, augmentant ainsi la température ressentie.
- **Tenue vestimentaire** : Une tenue adéquate peut aider à réguler la sensation de chaleur. Une tenue légère en été et chaude en hiver permet d'adapter le corps aux variations de température.
- **Gestion des ouvertures** : L'ouverture et la fermeture des fenêtres participent à la régulation de la température intérieure. En été, il est recommandé de les ouvrir la nuit pour évacuer la chaleur accumulée la journée et éviter la surchauffe.

Il est donc essentiel que chaque occupant adopte des comportements favorables à un confort thermique optimal. L'adaptation de ces habitudes au fil des saisons et des conditions climatiques est un gage de bien-être et d'économies d'énergie.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

7.8.1.9. Comment améliorer le confort thermique avec l'isolation ?

Système d'isolation pour toute la maison

Une isolation globale de votre habitat vous permettra d'obtenir un confort thermique optimum. Elle permettra de **réduire les déperditions** thermiques et **maîtriser les variations** de température. Bien évidemment, pour des raisons de budget, cibler les travaux d'isolation sur les parties de la maison qui posent le plus de problème est un choix judicieux.

Pour **l'isolation des murs et toiture** deux techniques principales existent :

- L'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) : elle permet de traiter efficacement les ponts thermiques, d'optimiser l'inertie thermique du bâtiment et de préserver l'espace intérieur.
- L'Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) : moins coûteuse, mais peut entraîner une réduction de l'espace habitable et n'élimine pas totalement les ponts thermiques.

Le **choix** des matériaux isolants et leur **mise en œuvre** devront être réfléchis. Les isolants écologiques ont la capacité de **gérer l'humidité** contenue dans l'air. Certains sont tout particulièrement adaptés pour se protéger de la chaleur estivale. La pose d'un frein vapeur sera indispensable pour **améliorer l'étanchéité** du bâtiment, surtout au niveau des menuiseries.

L'isolation des combles perdus pourra être mise en œuvre avec un isolant en vrac ou la double couche croisée d'un panneau isolant semi-rigide.

L'isolation thermique des sols est importante pour supprimer la sensation de froid aux pieds. Selon le type de sol et de logement, plusieurs techniques d'isolation sont possibles

- **L'isolation par le dessus** : cette méthode consiste à poser un isolant mince sur le sol existant, puis à recouvrir le tout d'un revêtement. C'est une solution efficace, mais elle nécessite de prendre en compte la hauteur sous plafond qui sera légèrement réduite.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

- **L'isolation par le dessous** : cette technique est souvent utilisée lorsque le sol est au-dessus d'un vide sanitaire ou d'un sous-sol. Elle consiste à fixer l'isolant sous le plancher.
- **La création d'un plancher intermédiaire** : cette solution est souvent adoptée lors d'une rénovation lourde. Elle implique de démolir le sol existant pour ensuite créer un nouveau plancher avec un isolant intégré.

La correction thermique sur les murs

Si vous ne pouvez pas isoler par l'intérieur à cause du **manque de place**, il est alors possible d'appliquer un enduit isolant sur votre mur. Ceux-ci, beaucoup **plus minces** qu'un système d'isolation classique, ont un rôle de **correction thermique**. Ils n'isolent pas à proprement dit, mais coupent **l'effet de paroi froide** grâce à leurs composition à base de chaux, d'argile et granulats (silice, liège ou autre).

Conclusion : comment obtenir un bon confort thermique ?

Un niveau de confort thermique satisfaisant dans l'habitat est un enjeu majeur, englobant une multitude de paramètres pour garantir le bien-être des occupants. En comprenant les **sept notions essentielles**, nous sommes mieux armés pour créer des espaces où la température, l'humidité, la qualité de l'air et la distribution de la chaleur sont **soigneusement équilibrées**. Le choix judicieux des matériaux de construction, en mettant l'accent sur l'effusivité, la diffusivité, l'isolation et l'inertie, peut significativement influencer la perception thermique. Le bon choix du système de chauffage et sa régulation, la gestion des apports solaires saisonniers et la gestion du taux d'humidité sont des éléments clés pour **optimiser le confort** thermique tout en **minimisant la consommation d'énergie**. [19]

7.9. Le confort pour la santé :

Certains éléments relatifs à l'environnement intérieur peuvent causer des troubles de santé. Ceux-ci peuvent varier en fonction de l'âge, du sexe, de l'état de santé,... mais surtout en fonction de la sensibilité de chacun. En plus, on peut distinguer les troubles de santé objectifs des troubles de santé subjectifs.

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

7.10. Le confort pour le bâtiment :

La plupart des problèmes qui surviennent au niveau du bâtiment sont liés à la présence d'humidité non désirée. L'humidité dans un logement peut provenir d'une fuite dans la toiture, d'un solin mal achevé, de fenêtres ou de portes qui se ferment mal, de condensation sur des ponts thermiques, d'humidité ascensionnelle, de fuites dans des canalisations,... Etant donné que l'humidité peut causer des dégâts au bâtiment et mener à des situations malsaines, elle peut mener aux problèmes suivants: Détérioration des finitions: peintures, papier peint, plafonnage... Formation de moisissures pouvant atteindre la structure du bâtiment ou le bois Diminution du pouvoir isolant.

7.11. Le confort visuel:

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière. L'obtention d'un environnement visuel confortable dans un local favorise le bien-être des occupants. Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision.[20]

Quelque soit l'usage, le confort visuel se garantit autour de 6 critères :

1. un éclairage suffisant
2. un éclairage uniforme
3. l'absence de réflexion
4. l'absence d'éblouissement
5. l'absence d'ombre
6. Un rendu des couleurs suffisant

Exemples en fonction du programme :

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Pour les bureaux

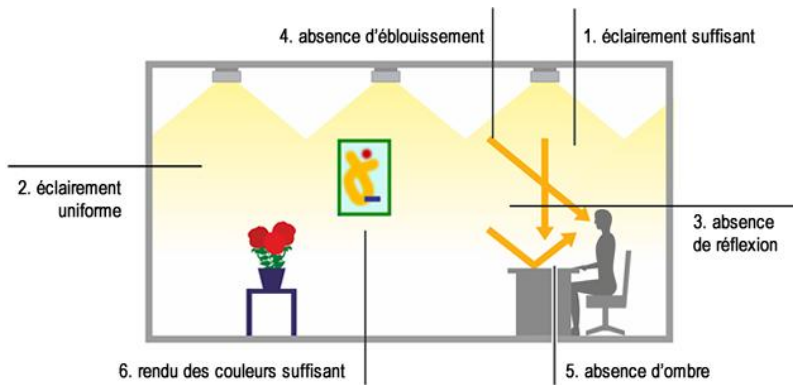


Figure 14: Critères d'un bon éclairage de poste de travail

Pour les salles de sports

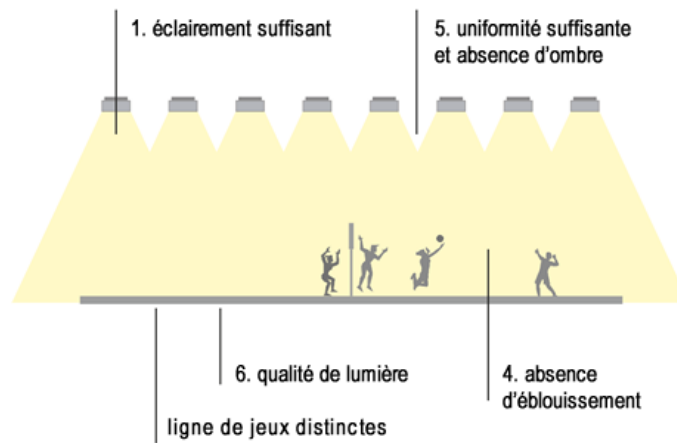


Figure 15: Critères d'un bon éclairage pour une salle de sport

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

Pour les ateliers

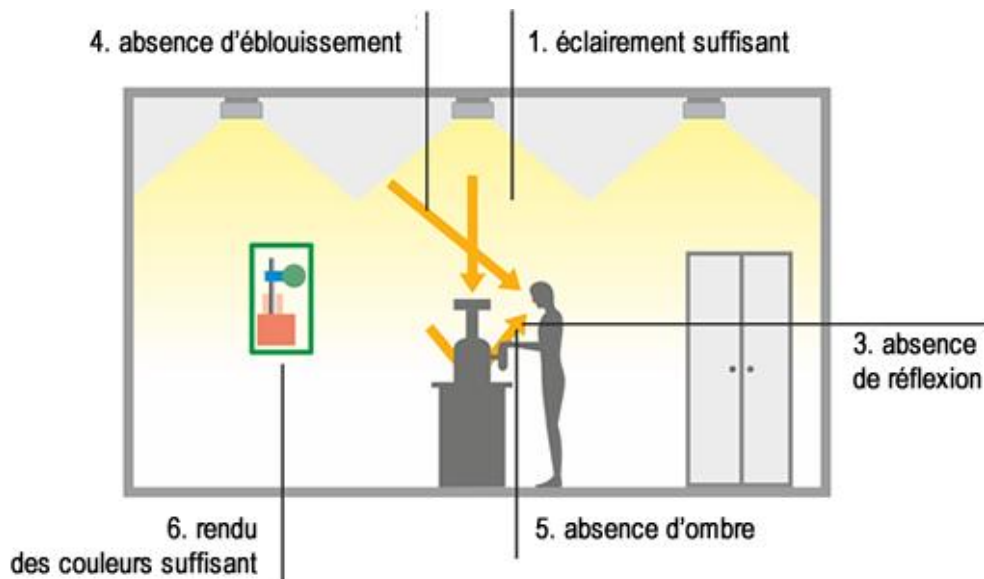


Figure 16: Critères d'un bon éclairage pour les ateliers

7.12. Le confort acoustique:

Le confort acoustique est un élément souvent négligé des espaces intérieurs. Or l'équilibre psychologique et la productivité au travail des occupants y sont intimement liés. Un bon confort acoustique a une influence positive sur la qualité de vie au quotidien et sur les relations entre usagers d'un bâtiment.

A contrario, un mauvais confort acoustique génère des effets négatifs sur l'état de santé : nervosité, stress, sommeil contrarié, fatigue.

Pour améliorer le confort d'un bâtiment, on peut agir de deux manières :

- empêcher que les bruits extérieurs au local n'y pénètrent (par l'isolation des murs, planchers, plafond...);
- éviter que les bruits en provenance du local ne résonnent dans les espaces peu meublés - cage d'escalier... (par la correction acoustique des surfaces qui réverbèrent le son, par le placement d'absorbants).[26]

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

8. Paramètres climatiques :

8.1. Température de l'air :

Elle est mesurée à l'ombre, généralement dans une boîte ventilée à 1.2 à 1.8 m au-dessus du niveau du sol.

Elle est essentiellement influencée par l'ensoleillement (rayonnement du soleil qui chauffe la terre le jour et du rayonnement nocturne qui la refroidit la nuit), mais également par le vent, l'altitude et la nature du sol .

8.2. Le vent :

Le vent est un facteur climatique produit par les déplacements d'air à la surface de la terre, des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Ce déplacement est causé également par la topographie locale et la rugosité des surfaces. Le vent est mesuré à 10 m au-dessus du sol en plein pays, mais plus élevé dans les zones bâties pour éviter les obstacles . Le vent est décrit par sa vitesse et sa direction. Il est mesuré par un anémomètre. Des diagrammes de fréquence, roses de vent, sont souvent tracés pendant chaque mois de l'année ou pendant les saisons principales pour aider les architectes à connaître les effets internes du vent sur le bâtiment.

8.3. Humidité de l'air :

L'humidité de l'air peut être exprimée comme la pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires . L'humidité n'a pas des influences sur le confort quand les températures sont basses mais dans les climats chaud et humide elle est une source d'inconfort parce que les échanges thermiques par évaporation ont lieu surtout sur la surface de la peau.

8.4. Précipitations :

C'est le volume total de pluie, grêle, neige ou rosée, mesuré par des pluviomètres et exprimé en millimètre par unité de temps (jour, mois ou année). Les nuages jouent un rôle crucial dans le taux des précipitations de la planète. Leur distribution est variable mais elles se produisent généralement dans les régions qui se caractérisent par les

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

branches croissantes des cellules de Hadley et de Ferrel dans les zones tropicales et les latitudes moyennes.

8.5. Rayonnement solaire :

« Le soleil fournit 99,998% de l'énergie qui anime l'atmosphère, le reste 0,002% provient de l'intérieur de la Terre. L'équilibre de la température moyenne globale de la terre est déterminé par un équilibre entre l'énergie acquise par l'absorption du rayonnement solaire entrant et l'énergie perdue dans l'espace par l'émission du rayonnement infrarouge. La quantité d'énergie solaire absorbée dépend du rayonnement entrant et les propriétés réfléchissantes de la terre . On distingue trois types de rayonnement qui constituent le rayonnement global ; Le rayonnement diffus dans toutes les directions par les molécules d'air, le rayonnement direct qui frappe le sol directement et le rayonnement réfléchi par les points d'eau et les bâtiments voisins.

Le rayonnement solaire est un élément important à prendre en considération dans la conception bioclimatique. L'architecte doit en tirer profit dans les climats froids ou dans les périodes hivernales et en éviter dans les climats chauds ou dans les périodes estivales. Le rayonnement solaire est un facteur déterministe pour les façades surtout dans les climats froids .

9. Les différentes méthodes d'amélioration des zones de confort :

9.1. Définition du confort thermique dans les bâtiments

Le confort thermique dans les bâtiments est défini comme le sentiment de bien-être ressenti par les occupants en fonction de l'environnement intérieur. Il est étroitement lié à l'équilibre entre la température interne du corps humain et la température ambiante du logement. Le confort thermique est influencé par un certain nombre de facteurs, notamment la température de l'air, l'humidité, la qualité de l'air, le mouvement de l'air et la température des murs. Atteindre un confort thermique optimal est un défi majeur pour minimiser la consommation d'énergie tout en assurant une température intérieure confortable et constante. Pour y parvenir, il convient d'appliquer différents principes et technologies de construction. Il convient également de noter que le confort thermique n'est pas fixe. Sa perception est subjective et varie d'un individu à l'autre, sous l'influence de nombreux facteurs. Vêtements : la quantité et le type de vêtements portés jouent un

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

rôle important dans la perception de la température. Métabolisme : la production de chaleur dans le corps humain influence la façon dont elle est ressentie.

Activité physique : l'intensité de l'activité physique modifie la sensation de chaleur.

Quelle est la température de confort ?

La température ambiante à l'intérieur d'une maison a un impact significatif sur le confort thermique. Elle dépend de facteurs tels que la qualité de l'isolation, le système de chauffage et le réglage du thermostat. En revanche, des températures trop basses rendent l'environnement inconfortable, tandis que des températures trop élevées entraînent une surconsommation d'énergie. En hiver, il est recommandé de maintenir la température ambiante autour de 18 °C, ou 22 °C en présence d'enfants en bas âge. En général, une température confortable se situe entre 19°C et 20°C. Pour chaque augmentation de température de 1°C, la consommation d'énergie augmente de 7 %. Vous pouvez également économiser de l'énergie en abaissant la température de 2 à 3 °C la nuit et pendant les périodes d'inoccupation.

9.2. Température des murs de la maison

La température des murs d'une maison, qu'ils soient opaques ou transparents, joue un rôle déterminant dans la température ressentie. Des murs et des fenêtres froids peuvent provoquer une sensation de malaise, même si la température ambiante est confortable. Les sols et les plafonds doivent également être pris en compte. Par exemple, si le thermostat est réglé sur 21°C mais que les murs n'ont que 15°C de hauteur, la température ressentie sera de 18°C. Inversement, dans une pièce bien isolée où la température des murs est de 20°C, la température ressentie sera de 20,5°C. Une isolation efficace est essentielle pour améliorer la température des murs. La réduction des ponts thermiques dans la mesure du possible et l'installation de vitrages performants sont des mesures importantes.

Les taux de transpiration et de diffusion thermiques des matériaux muraux jouent également un rôle décisif. Les taux de transpiration et de diffusion thermiques des matériaux ont un impact significatif sur le confort thermique. Pour information : la sensation de froid est due à la libération de calories par le corps humain. Celle-ci est contenue au contact des surfaces et dans l'air ambiant. Par exemple, lorsque vous posez

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

vos pieds sur un sol carrelé froid, les calories sont transférées de vos pieds au sol et vous avez froid. Le taux d'émanation d'un matériau définit sa capacité à absorber ou à libérer des calories. Il convient de noter que l'émissivité ne se substitue pas à la qualité de l'isolation. Cependant, elle joue un rôle dans la gestion des températures intérieures en absorbant les flux de chaleur. Exemple : la forte émissivité des briques de terre crue leur permet d'absorber un maximum de chaleur. Elle restitue également la chaleur avec la même capacité. La diffusivité caractérise la capacité d'un matériau à transférer des signaux de température d'un point à un autre. La conductivité thermique détermine la vitesse à laquelle la chaleur se propage dans un matériau. Elle est liée à la conductivité thermique d'un matériau et à sa capacité à stocker la chaleur. Exemple : la faible diffusivité des briques de terre signifie que la chaleur stockée se diffuse lentement. En d'autres termes, la conductivité et la diffusivité thermiques d'un matériau contribuent à la régulation thermique d'un bâtiment. Le confort thermique peut être amélioré en choisissant des matériaux ayant de bons taux d'émanation et de faibles taux de diffusion, par exemple : la terre crue, la terre cuite, la chaux de chanvre.

9.3. Le choix d'un mode de chauffage pour un bâtiment

Le choix d'un mode de chauffage est crucial dans la recherche d'un confort thermique optimal. Les deux principales méthodes, la convection et le rayonnement, présentent des caractéristiques différentes qu'il convient de prendre en compte.

9.3.1. Le chauffage par convection

Le chauffage par convection repose sur le principe de la circulation de l'air chaud dans la pièce. L'air chauffé par résistance électrique monte et diffuse la chaleur dans toute la pièce. L'avantage de ce mode de chauffage est que la température augmente rapidement et que la chaleur est ressentie immédiatement. Cependant, le chauffage par convection a aussi ses limites. Lorsque l'air chaud monte, il se produit une stratification de la chaleur, la partie supérieure de la pièce étant plus chaude que la partie inférieure. Cela peut entraîner une sensation de « pieds froids ». Le mouvement de l'air provoqué par les convecteurs peut entraîner des courants d'air, ce qui peut réduire le confort et inciter les gens à chauffer davantage la pièce. Les mouvements d'air favorisent la circulation de la poussière et des allergènes. Les convecteurs ont une élévation de température élevée. Ils

CHAPITRE 1 :Recherche et analyse bibliographique

posent des problèmes de sécurité pour les enfants. Le chauffage par convection assèche l'air.

9.3.2. Chauffage par rayonnement

Le chauffage par panneaux radiants procure une chaleur plus naturelle. Les rayons infrarouges réchauffent les surfaces et les objets. Cette chaleur est comparable à celle du soleil. Ce mode de chauffage présente de nombreux avantages : répartition homogène et stable de la chaleur, réduction des courants d'air et des fluctuations de température. Perception rapide de la chaleur, même à des températures ambiantes relativement basses. Confort thermique élevé grâce à la faible perte de chaleur corporelle par rayonnement. Les systèmes utilisant le principe du rayonnement sont les suivants : le chauffage par le sol est très confortable, mais met du temps à réagir en raison de l'inertie du sol. Les poêles de masse, qui diffusent la chaleur lentement et uniformément. Les radiateurs électriques à inertie, qui accumulent la chaleur et la diffusent ensuite. Les radiateurs à eau, qui diffusent la chaleur par rayonnement et convection.[27

**CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution
d'air dans un habitacle**

**CHAPITRE 2 :
Modélisation
mathématique de la
distribution d'air
dans un habitacle**

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

1.Introduction :

Ce chapitre d'étude se concentre sur la modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle, en s'appuyant sur des simulations numériques basées sur la mécanique des fluides computationnelle (CFD). L'objectif est d'analyser l'influence de la position des entrées d'air sur l'homogénéisation des conditions thermiques, en tenant compte des phénomènes de turbulence, convection naturelle et de stratification thermique. La **discrétisation** des équations aux dérivées partielles, qui permet de transformer un problème continu en un système discret, résoluble numériquement. Les principales méthodes utilisées sont :

- La méthode des **éléments finis**,
- La méthode des **différences finies**,
- La méthode des **volumes finis** – actuellement la plus répandue en **CFD** (Computational Fluid Dynamics).

2. Choix de la méthode numérique

Pour aborder numériquement le problème étudié, il est essentiel de convertir les équations différentielles du modèle mathématique en un ensemble d'équations algébriques par le biais de la discrétisation. Ce processus représente une phase cruciale qui permet de reconstituer un format adapté pour le traitement numérique .

Parmi les techniques de discrétisation utilisées dans l'analyse des flux et des transferts de chaleur, on trouve principalement la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. Notre étude s'appuie sur la méthode des volumes finis, choisie pour ses nombreux bénéfices. Cette approche présente effectivement des avantages considérables : elle se distingue par sa facilité d'implémentation, garantit de manière rigoureuse la conservation de la masse et du momentum (tant au niveau local de chaque volume de contrôle qu'au niveau global du domaine étudié), et propose une grande flexibilité pour le traitement de formes géométriques complexes.

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Le principe fondamental de la méthode des volumes finis repose sur une démarche conservatrice locale, établissant un bilan des grandeurs physiques pour chaque cellule de discrétisation (volume de contrôle). L'utilisation du théorème de la divergence permet alors de réécrire ce bilan sous forme d'intégration des flux passant à travers les limites du volume étudié.

3. Principe de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis constitue une approche numérique privilégiée pour la transformation des équations aux dérivées partielles en expressions algébriques solubles. Sa mise en œuvre s'articule autour d'un processus méthodique structuré en quatre étapes essentielles :

3.1. Discrétisation spatiale du domaine d'étude

Cette phase initiale consiste à établir un maillage représentatif de la géométrie étudiée.

Le processus implique :

- Le positionnement stratégique des nœuds de calcul au sein du domaine
- La construction d'un volume de contrôle autour de chaque nœud
- La délimitation précise des interfaces entre volumes adjacents

Cette subdivision du domaine forme la structure fondamentale sur laquelle reposera l'ensemble de la procédure numérique.

3.2. Intégration des équations gouvernantes

Les équations aux dérivées partielles caractérisant les phénomènes physiques sont intégrées sur chacun des volumes de contrôle préalablement définis. Cette intégration transforme les expressions différentielles continues en bilans discrets appliqués aux volumes élémentaires, assurant ainsi la conservation rigoureuse des grandeurs physiques considérées.

3.3. Formulation des approximations numériques

Cette étape cruciale consiste à définir un profil d'interpolation décrivant la variation des variables d'intérêt (température, pression, vitesse, etc.) entre les nœuds consécutifs. Ces approximations permettent d'évaluer avec précision les dérivées aux interfaces des

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

volumes de contrôle, conduisant à l'élaboration d'équations algébriques discrétisées spécifiques à chaque nœud du domaine.

3.4. Résolution du système algébrique résultant

L'application systématique de cette procédure engendre un ensemble d'équations algébriques dont le nombre correspond exactement au nombre de nœuds dans le maillage. La résolution de ce système matriciel fournit les valeurs discrètes des variables recherchées à chaque point nodal.

Cette correspondance biunivoque entre équations et inconnues confère à la méthode des volumes finis une efficacité remarquable contrairement aux autres approches numériques. En effet, la formulation conserve remarquablement les principes physiques fondamentaux tout en offrant une flexibilité considérable dans le traitement de configurations géométriques complexes et de phénomènes physiques variés.

4.Discrétisation des équations gouvernantes :

La méthode des volumes finis repose principalement sur l'intégration des équations gouvernantes pour chaque volume de contrôle. Cette intégration permet d'obtenir des équations algébriques, simplifiant ainsi la résolution des équations de transport.

Chaque nœud du maillage est entouré d'un ensemble de surfaces délimitant un volume élémentaire. Les variables du problème ainsi que les propriétés du fluide sont définies et stockées aux nœuds de ce volume.

Les équations qui régissent l'écoulement sont exprimées sous forme d'équations moyennées dans un repère cartésien (x , y , z) .

Équation de conservation de la masse (continuité) :

Forme théorique (incompressible) :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Cela signifie que le débit massique entrant = débit massique sortant → pas d'accumulation de masse.

Équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) :

Forme simplifiée (incompressible, laminaire ou turbulence modérée) :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \dots (2)$$

Puisque l'étude concerne le régime **stationnaire**, $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$

Équation de conservation de l'énergie (si les murs ne sont pas adiabatiques)

Forme :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) \dots \dots \dots (3)$$

5. Les équations gouvernantes pour le cas bidimensionnelle

Le problème considéré est régi par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et de l'énergie, appliquées à un écoulement d'air incompressible avec densité constante. L'hypothèse de Boussinesq n'a pas été retenue dans cette modélisation, étant donné que les variations de température sont modérées et que la convection forcée est dominante. Par ailleurs, le terme de dissipation visqueuse dans l'équation d'énergie est négligé en raison de sa contribution mineure dans les régimes étudiés.[28]

La projection des équations de conservation dans un repère cartésien bidimensionnel (x, y) donne :

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

5.1. Équation de conservation de la masse (continuité) :

Pour un fluide incompressible et en 2D (coordonnées X et Y) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

Où :

- u : composante de la vitesse selon X,
- v : composante de la vitesse selon Y.
- x, y : coordonnées spatiales horizontale et verticale [m]

a. **Équations de conservation de la quantité de mouvement (Navier–Stokes 2D) :**

Suivant l'axe x :

$$\rho \left(u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \mu \left(\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \dots \dots (6)$$

- ρ : densité de l'air [kg/m³], dans ton cas constante, typiquement $\rho=1.225$ kg/m³
- μ : viscosité dynamique de l'air [kg/m·s], environ $\mu=1.7894 \times 10^{-5}$ [kg/m·s]
- $\frac{\partial x}{\partial u}, \frac{\partial y}{\partial u}$: dérivées partielles de la vitesse selon x ou y
- $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$: termes de diffusion visqueuse

Suivant l'axe y :

$$\rho \left(u \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = - \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + \mu \left(\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right) + \rho g \dots (7)$$

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

- g : accélération gravitationnelle [m/s^2], ici $g = -9.81 \frac{m}{s^2}$ (vers le bas)
- v : composante verticale de la vitesse (y)
- Les autres symboles sont les mêmes que dans l'équation précédente

5.2. Équation de l'énergie :

$$\rho C_p \left(u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) = k \left(\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right) \dots (8)$$

Ces équations sont résolues numériquement dans Fluent 6.3.26 sous régime stationnaire, avec modèle de turbulence **k-ε standard** et conditions aux limites correspondant à l'étude : vitesse d'entrée de 0.2 m/s, température ambiante de référence à 293 K, gravité activée sur l'axe vertical ($y = -9.81 \text{ m/s}^2$), et parois définies comme adiabatiques ou à température fixe selon les scénarios testés.

6. Les modèles de turbulence :

Les modèles de turbulence se classent selon leur complexité, déterminée par le nombre d'équations de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système. On distingue ainsi :

- Les modèles à zéro équation (algébriques),
- Les modèles à une équation,
- Les modèles à deux équations, les plus répandus en CFD.

Parmi ces derniers, le modèle k-ε standard est le plus couramment utilisé dans les codes de simulation. [16]

Dans Fluent, trois modèles de turbulence sont disponibles :

1. Le modèle k-ε standard,
2. Le modèle RSM (Reynolds Stress Model),

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

3. Le modèle k-ε RNG (ReNormalization Group).

Pour notre cas le modèle k-ε est le mieux adapté pour ce type d'étude

Modèle k-ε :

Pour cette étude, le modèle k-ε standard a été retenu. Ce modèle semi-empirique repose sur deux équations de transport :

- L'énergie cinétique turbulente (k)
- Son taux de dissipation (ε)

Dans ce cadre, la viscosité turbulente est calculée à partir de k et ε via les relations suivantes :

6.1. Énergie cinétique turbulente k :

$$k = \left(\frac{3}{2}\right) * (U \cdot I)^2 \quad \left[\frac{m^2}{s^2}\right] \dots\dots\dots(9)$$

Où :

U : Vitesse d'entrée $U=0.2$ [m/s]

I : Intensité de turbulence : $I = 5\% = 0.05$

6.2. Longueur de turbulence l :

Si dimension caractéristique (hauteur entrée) $Dh=0.5$ m :
 $l = 0.07 \cdot Dh = 0.035$ m

c. Taux de dissipation ε :

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad \left[\frac{m^2}{s^3}\right] \dots\dots\dots(10)$$

Où :

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

C_μ : Constant 0.09

7. Notion de maillage dans la méthode des volumes finis

7.1. Définition et fonction du maillage

Le maillage constitue l'élément structurel fondamental de toute approche numérique de discrétisation spatiale, particulièrement dans le cadre de la méthode des volumes finis. Il représente la subdivision géométrique du domaine physique étudié en un ensemble d'entités élémentaires interconnectées, formant ainsi le support discret sur lequel s'appuiera la résolution numérique des équations gouvernantes.

Cette opération de discrétisation spatiale transforme un milieu continu, caractérisé par une infinité de points, en une représentation discrète composée d'un nombre fini d'éléments. Chacune de ces entités élémentaires, désignée sous le terme de volume de contrôle, est associée à un nœud de calcul où seront évaluées les variables d'intérêt.

7.2.Caractéristiques essentielles d'un maillage performant

La qualité du maillage influence directement la précision et la stabilité de la solution numérique obtenue. Un maillage optimal présente plusieurs attributs déterminants :

- Conformité géométrique : Capacité à représenter fidèlement les contours et particularités du domaine physique réel
- Résolution adaptative : Raffinement sélectif dans les zones présentant de forts gradients ou des phénomènes localisés
- Régularité structurelle : Organisation harmonieuse des éléments minimisant les distorsions géométriques
- Orthogonalité des interfaces : Alignement préférentiel des frontières entre volumes avec les directions principales des flux physiques

7.3.Typologie des maillages

Dans la pratique numérique, plusieurs configurations de maillage sont envisageables selon la complexité géométrique du problème et les phénomènes physiques considérés

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

7.4.Maillages structurés

Caractérisés par une organisation topologique régulière, ces maillages présentent une numérotation systématique des nœuds selon des coordonnées logiques (i,j,k). Leur mise en œuvre s'avère relativement simple et conduit à des schémas numériques efficaces, particulièrement adaptés aux géométries cartésiennes ou faiblement curvilignes.

7.5.Maillages non structurés

Offrant une flexibilité géométrique supérieure, ces configurations permettent de s'adapter à des domaines hautement complexes. Les volumes de contrôle, généralement de forme polyédrique quelconque, sont interconnectés selon une topologie variable nécessitant des structures de données plus élaborées.

7.6.Maillages hybrides

Ces approches composites combinent différentes typologies de maillage au sein d'un même domaine, optimisant ainsi la discrétisation en fonction des contraintes locales. On peut, par exemple, utiliser un maillage structuré dans les régions régulières et un maillage non structuré près des singularités géométriques.

7.7.Considérations pratiques pour l'élaboration du maillage

L'établissement d'un maillage performant requiert une analyse préalable approfondie des phénomènes physiques dominants et des caractéristiques géométriques du domaine. Une attention particulière doit être accordée à :

- La densité nodale dans les régions présentant d'importants gradients
- La transition progressive entre zones de raffinement différent
- La minimisation des non-orthogonalités aux interfaces entre volumes
- L'optimisation du ratio d'aspect des éléments pour limiter les erreurs numériques

Le processus de maillage constitue ainsi une étape cruciale conditionnant fondamentalement la qualité de la solution numérique. Un compromis judicieux entre précision et coût calculatoire doit être recherché, en tenant compte des ressources informatiques disponibles et de la complexité intrinsèque du problème traité.

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

8. Présentation des logiciels Gambit et Fluent.

Dans le cadre méthodologique de notre approche de simulation numérique, l'exploitation du solveur FLUENT pour l'analyse des phénomènes d'écoulement nécessite une présentation approfondie de GAMBIT, préprocesseur spécifiquement conçu pour l'élaboration des structures géométriques discrétisées constituant le fondement des calculs numériques subséquents.

8.1. GAMBIT

GAMBIT constitue un environnement intégré de conception assistée par ordinateur (CAO) et de génération de maillage particulièrement sophistiqué. Cette plateforme logicielle permet l'élaboration précise de structures géométriques bidimensionnelles et tridimensionnelles, ainsi que la discrétisation spatiale optimisée de ces configurations. Son adoption généralisée dans les secteurs industriels de haute technologie (aéronautique, automobile, spatial, entre autres) témoigne de ses capacités avancées d'interface graphique et de modélisation. GAMBIT se distingue notamment par son aptitude à représenter des géométries complexes, qu'elles soient statiques ou dynamiques, et à leur associer des maillages conventionnels ou adaptatifs selon les exigences spécifiques des phénomènes à simuler. Cette polyvalence fonctionnelle en fait un instrument privilégié dans la chaîne de simulation numérique des écoulements et des transferts thermiques.

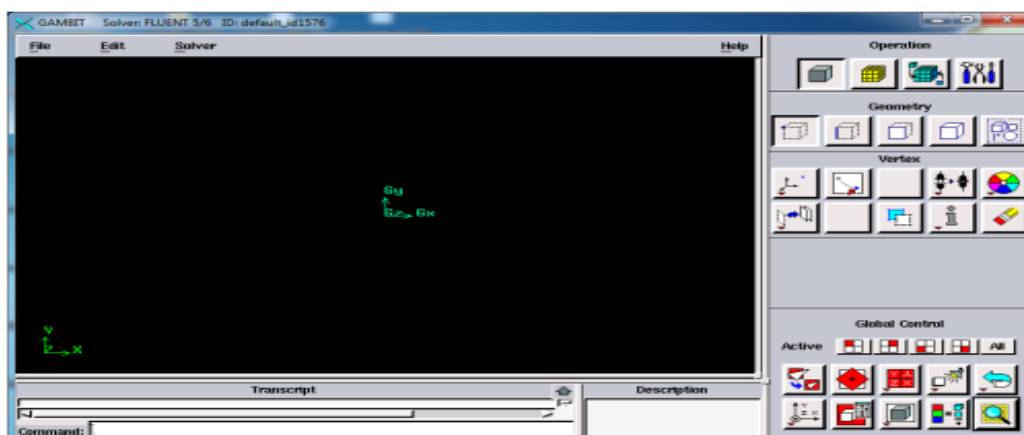


Figure 1 :Vue fenêtre Gambit [30]

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

8. 2. Construction de la géométrie

Dans la figure qui suit on aperçoit les différente instruction pour réaliser notre géométrie.

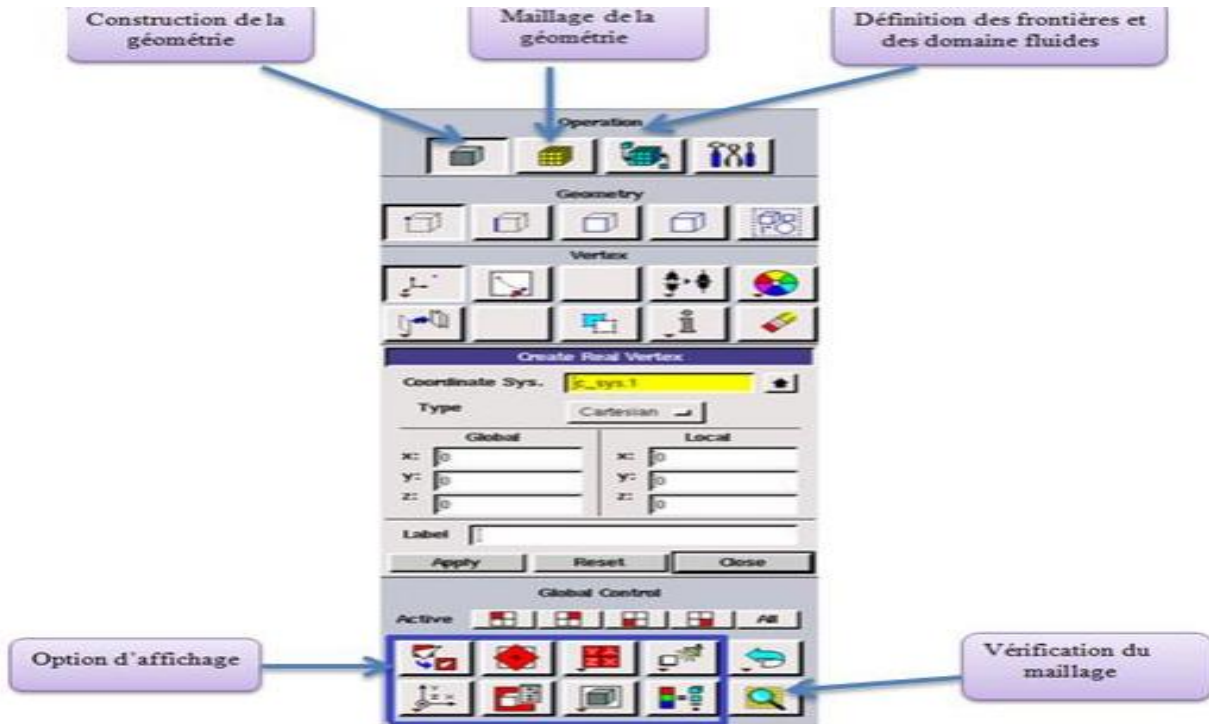


Figure 2 :Les étapes pour construire une géométrie

8.3. Optimisation du maillage

Le choix du maillage est crucial pour assurer la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour cela, il est nécessaire de définir les paramètres optimaux et d'adopter une stratégie de maillage adaptée à nos objectifs. Parmi ces paramètres, on peut mentionner :

- Le nombre de mailles ;
- La distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- La forme de la maille ;
- Les paramètres de déformation pour le maillage déformable.

La discrétisation des domaines bidimensionnels s'effectue principalement à l'aide de deux configurations élémentaires, chacune présentant des propriétés spécifiques adaptées à différentes applications :

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Type de maillage	Caractéristiques morphologiques	Applications privilégiées
Triangulaire	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité géométrique supérieure • Adaptation optimale aux contours irréguliers • Génération algorithmique efficace 	<ul style="list-style-type: none"> • Géométries complexes • Zones de transition • Raffinement local
Quadrilatéral	<ul style="list-style-type: none"> • Précision directionnelle améliorée • Minimisation des erreurs numériques • Organisation structurelle régulière 	<ul style="list-style-type: none"> • Écoulements directionnels • Couches limites • Phénomènes anisotropes

Tableau 1:Les différentes formes de maillage

Ce choix permet également de sélectionner le type de maillage des faces selon les options suivantes :

Stratégie	Description méthodologique	Avantages caractéristiques
Map	Génération d'une grille structurée composée d'éléments quadrilatéraux organisés selon une topologie régulière et prédéfinie	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation topologique optimale • Minimisation des erreurs numériques • Efficacité algorithmique supérieure
Sub map	Décomposition préalable du domaine en sous-régions topologiquement simples, suivie de l'application d'un algorithme de type Map à chaque composante	<ul style="list-style-type: none"> • Préservation des avantages du maillage structuré • Adaptation à des géométries modérément complexes • Continuité garantie aux interfaces entre sous-régions
Pave	Élaboration d'une distribution non structurée d'éléments quadrilatéraux s'adaptant librement aux caractéristiques géométriques du domaine	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité géométrique supérieure • Adaptation optimale aux contours irréguliers • Transition progressive des densités nodales
Tri primitive	Subdivision de la face en trois régions quadrilatérales distinctes, suivie de la	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement efficace des singularités topologiques

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Stratégie	Description méthodologique	Avantages caractéristiques
	génération d'un maillage spécifique dans chaque sous-domaine	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle local des caractéristiques du maillage • Compromis entre structure et adaptabilité

Tableau 2:Description des différents types de maillages

8.4. Conditions aux limites et définition de domaines sur Gambit

Le logiciel Gambit est capable de générer des maillages compatibles avec de nombreux solveurs. Il est donc essentiel de spécifier le logiciel de solveur avec lequel nous souhaitons traiter le fichier de maillage. En ce qui concerne les conditions aux limites, après avoir réalisé le maillage de notre géométrie, nous avons défini les différentes conditions ou limites dans Gambit. ‘Figure 19’

Dans notre étude on prend un habitacle de dimension 3.5 mètre de hauteur et 5 mètre de longueur avec une entré d'air qui varie suivant chaque cas a fin de déterminer la meilleur configuration qui assure le confort thermique dans notre habitacle :

Cas A : hauteur de fenêtre 3 mètre

Cas B : hauteur de fenêtre 2.5 mètre

Cas C : hauteur de fenêtre 2 mètre

Cas D : hauteur de fenêtre 1.5 mètre

Cas E : hauteur de fenêtre 1 mètre

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

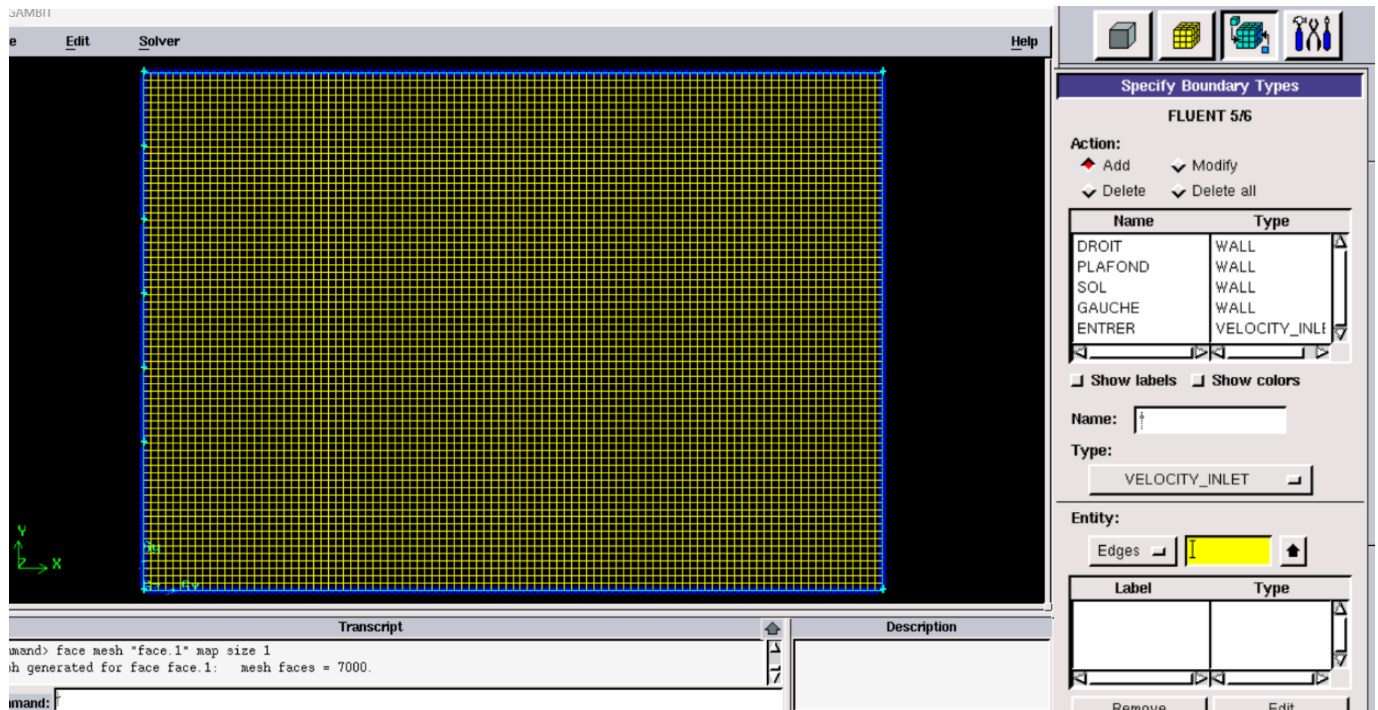


Figure 3 :Définition des conditions aux limites

8.5. Exportation du maillage de Gambit

Après la création de la géométrie et la définition des conditions aux limites, il est nécessaire d'exporter le maillage au format .msh (où "mesh" signifie maillage en anglais) afin que Fluent puisse le lire et l'utiliser.

8.6. PRESENTATION DE FLUENT

FLUENT est un logiciel de calcul conçu pour modéliser les écoulements de fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il est capable de résoudre des problèmes d'écoulement avec des maillages non structurés, adaptés aux géométries complexes, et ce, avec une relative facilité. Les types de maillages pris en charge incluent :

- Des maillages en 2D, triangulaires ou quadrilatéraux ;
- Des maillages en 3D, tels que tétraédriques, hexaédriques ou pyramidales ;
- Des maillages mixtes (hybrides).

FLUENT est développé en langage de programmation C, profitant pleinement de la flexibilité et de la puissance qu'offre ce langage, notamment en matière d'allocation

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

dynamique de la mémoire. De plus, il utilise une architecture permettant l'exécution de plusieurs processus simultanément, que ce soit sur un même poste de travail ou sur des postes distincts, pour une efficacité accrue. L'utilisation de FLUENT se fait via une interface graphique, mais les utilisateurs avancés peuvent personnaliser cette interface en écrivant des macros et des fonctions de menu pour automatiser certaines procédures. Ainsi, FLUENT offre, entre autres, les capacités de modélisation suivantes :

- Écoulements en 2D ou 3D ;
- Écoulements stationnaires ou instationnaires ;
- Écoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Écoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluides newtoniens ou non ;
- Transfert de chaleur par conduction, convection, les deux (conjugué) ou par rayonnement ;
- Écoulements avec changements de phases ;
- Écoulements en milieu poreux.

FLUENT utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations régissant l'écoulement, telles que l'équation de continuité, la quantité de mouvement et l'énergie. Cette technique, fondée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, se déroule en plusieurs étapes :

1. Division du domaine en volumes de contrôle discrets à l'aide d'un maillage de calcul.
2. Intégration des équations gouvernantes sur chaque volume de contrôle pour construire les équations algébriques des variables discrètes dépendantes, telles que les vitesses, pressions et températures.

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

3. Linéarisation des équations discrétisées et résolution du système d'équations linéaires résultant. Pour tenir compte des effets turbulents, le logiciel propose plusieurs modèles de turbulence, parmi lesquels :

- Le modèle à une équation de Spalart-Allmaras ;
- Le modèle à deux équations $k-\varepsilon$;
- Le modèle à deux équations $k-\omega$;
- Le modèle de contrainte de Reynolds (Reynolds stress model).

Le choix entre ces modèles dépend principalement des résultats obtenus pour chaque modèle selon les conditions aux limites définies. Bien qu'un modèle puisse donner de meilleurs résultats qu'un autre, cela est souvent lié à la nature des cas étudiés et à la pertinence du modèle de turbulence par rapport aux conditions aux limites.

8.7. Interface du code Fluent

La première étape lors de l'utilisation de FLUENT consiste à choisir le type de résolution que le logiciel devra effectuer : résolution en 2D ou en 3D. Ensuite, il faut ouvrir ou importer un maillage (fichier .msh) en suivant la procédure suivante :

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

File> Case> Import

```
File  Grid  Define  Solve  Adapt  Surface  Display  Plot  Report  Parallel  Help

Welcome to Fluent 6.3.26

Copyright 2006 Fluent Inc.
All Rights Reserved

Loading "C:\Fluent.Inc\Fluent6.3.26\lib\fl_s1119.dmp"
Done.

> Reading "C:\Users\DELL\OneDrive\Bureau\simulation\CAS1.msh"...
7171 nodes.
 60 mixed wall faces, zone 3.
100 mixed wall faces, zone 4.
 70 mixed wall faces, zone 5.
100 mixed wall faces, zone 6.
 10 mixed velocity-inlet faces, zone 7.
13830 mixed interior faces, zone 9.
 7000 quadrilateral cells, zone 2.

Building...
  grid,
  materials,
  interface,
  domains,
  zones,
    default-interior
    entrer
    sol
    droite
    plafond
    gauche
    fluid
  shell conduction zones,
Done.
```

Figure 4 :Ouverture du fichier en Fluent

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Define → Matériel Définition des caractéristiques du fluide

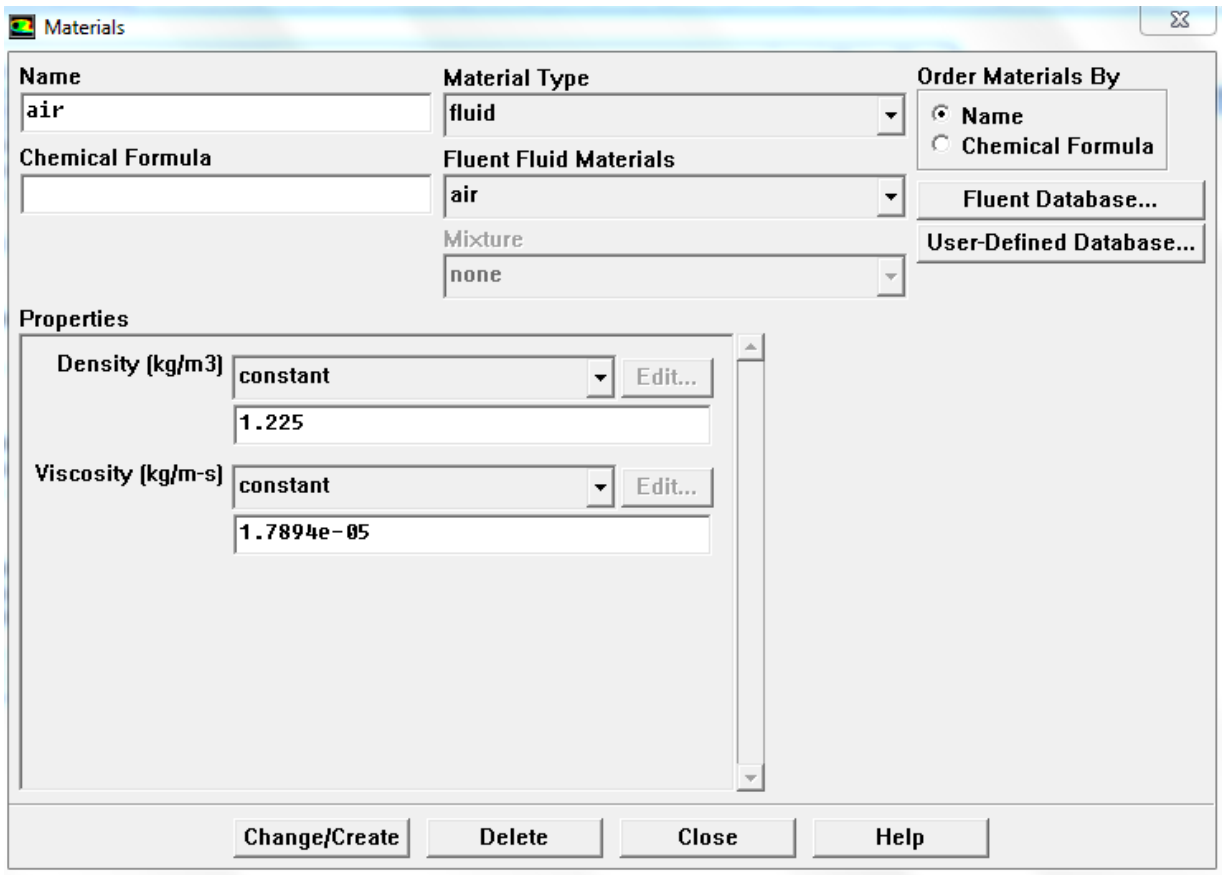


Figure 5 : caractéristiques du fluide

Define → Model activé l'équation d'énergie

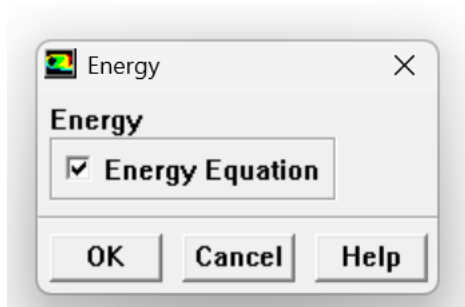


Figure 6 :équation d'énergie

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Define ———>Model Définition du modèle de turbulence

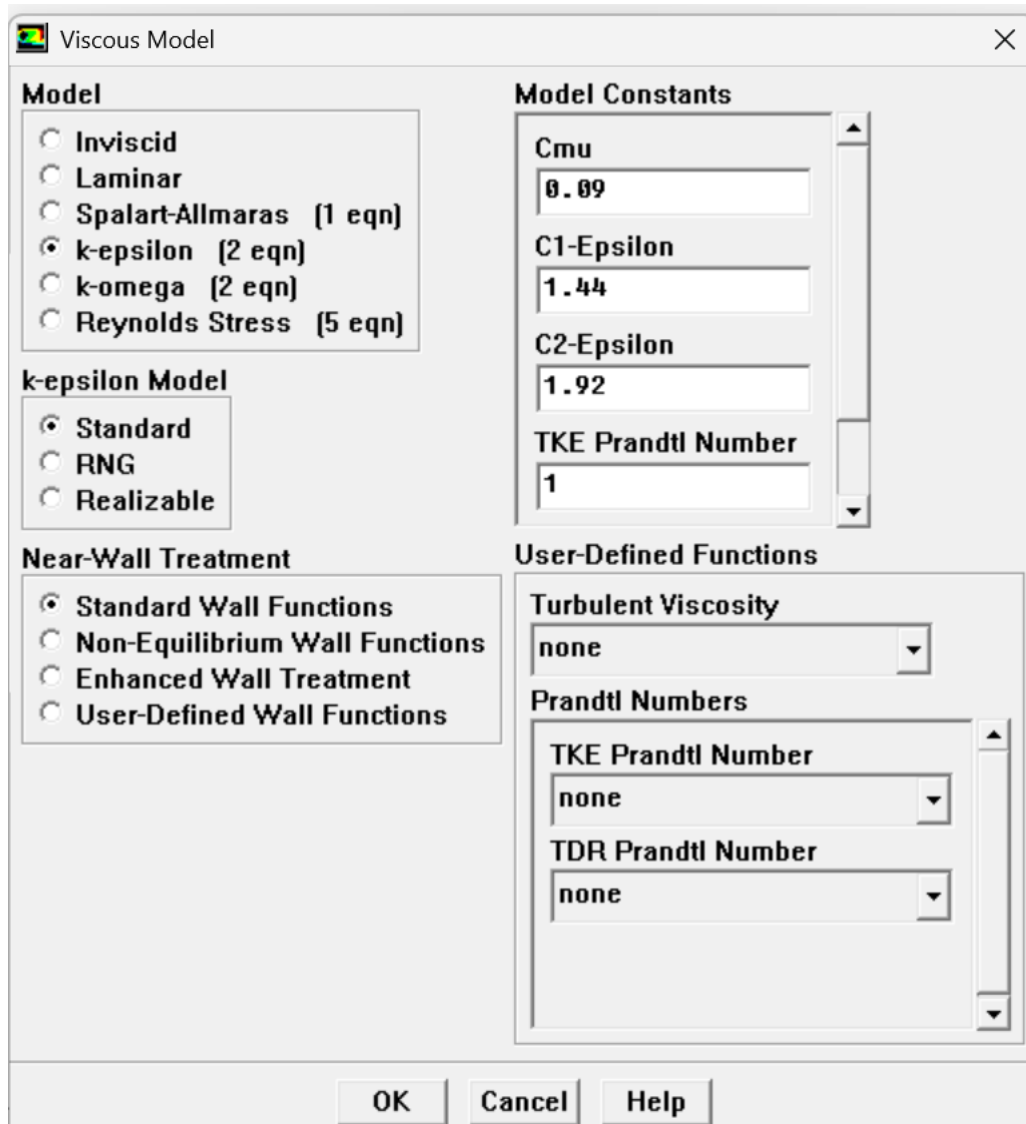


Figure 7 :Modèle de turbulence

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

8.8. Conditions aux limites utilisées par le code FLUENT

Les conditions aux limites de notre simulation sont illustrées dans la figure suivante. Nous choisissons une vitesses et une température d'entrée pour la fenêtre dans notre simulation.

Define — Boundary Condition

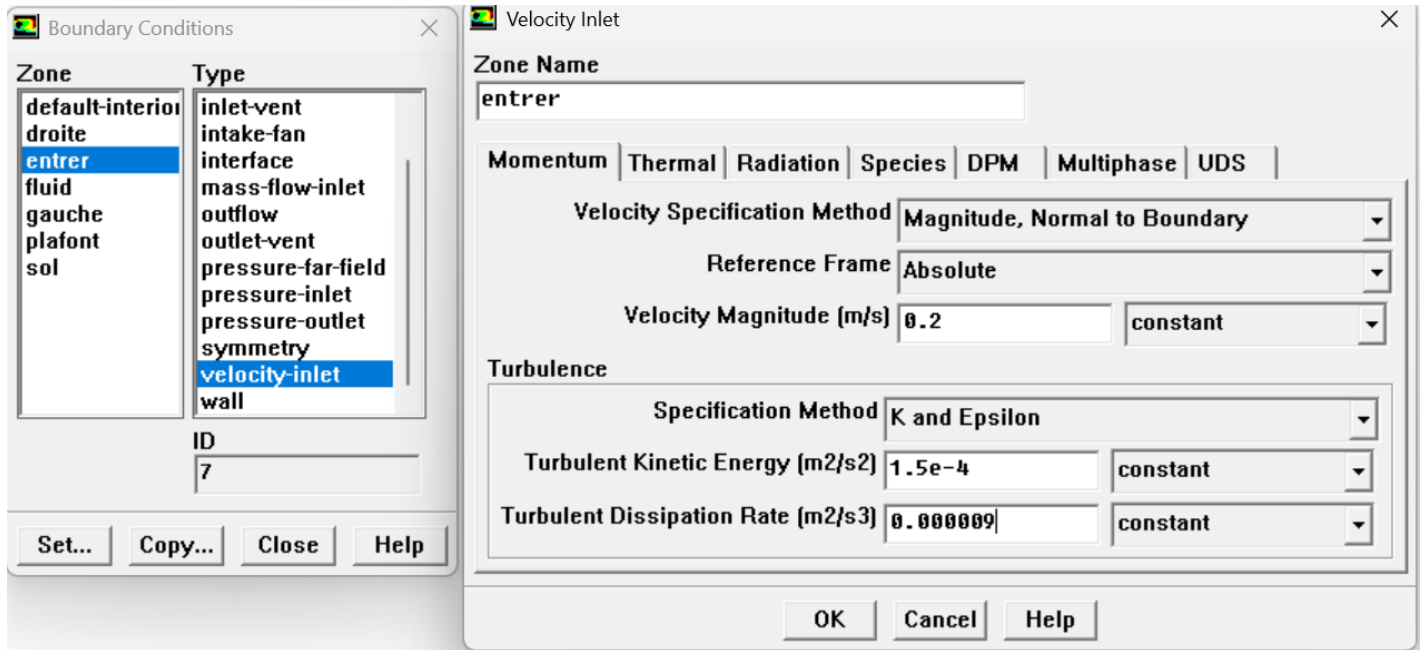


Figure 8 :Condition aux limites

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

8.9. Solution numérique

Solve ———> Controls ———> Solution

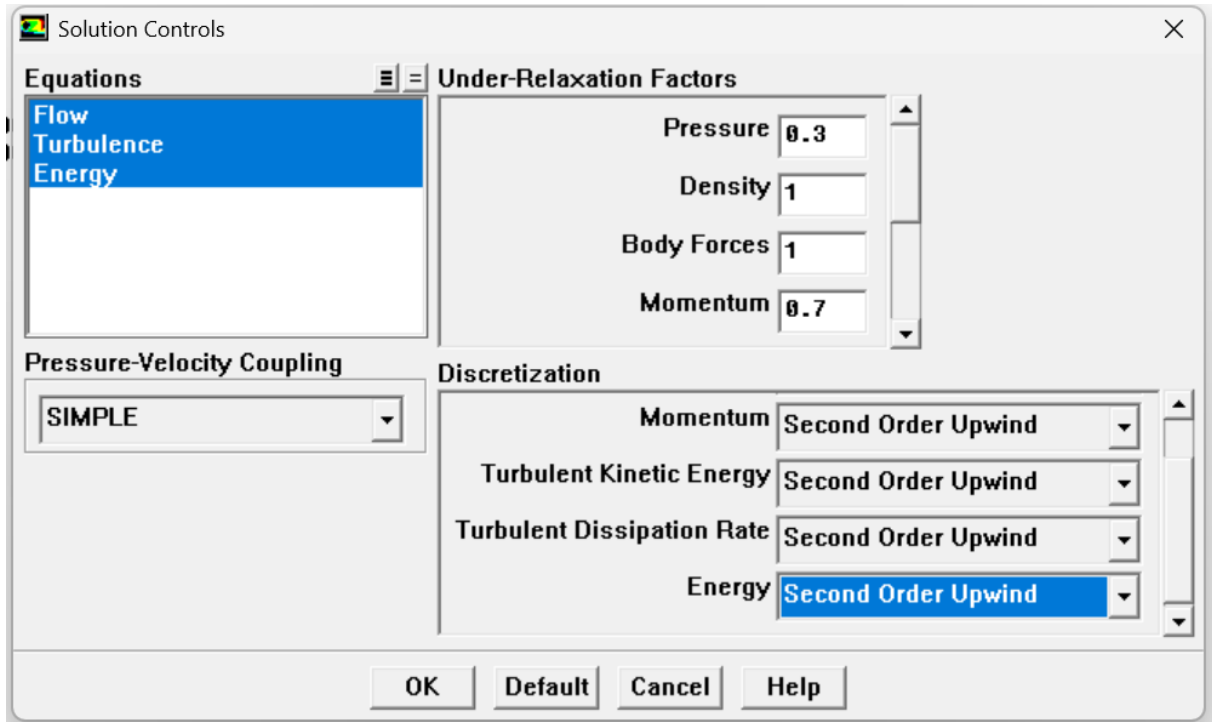


Figure 9 :Paramètres dynamique

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Solve → Monitors → Residual

La figure suivante (figure 26) illustre les résidus des équations de notre simulation jusqu'à atteindre la convergence.

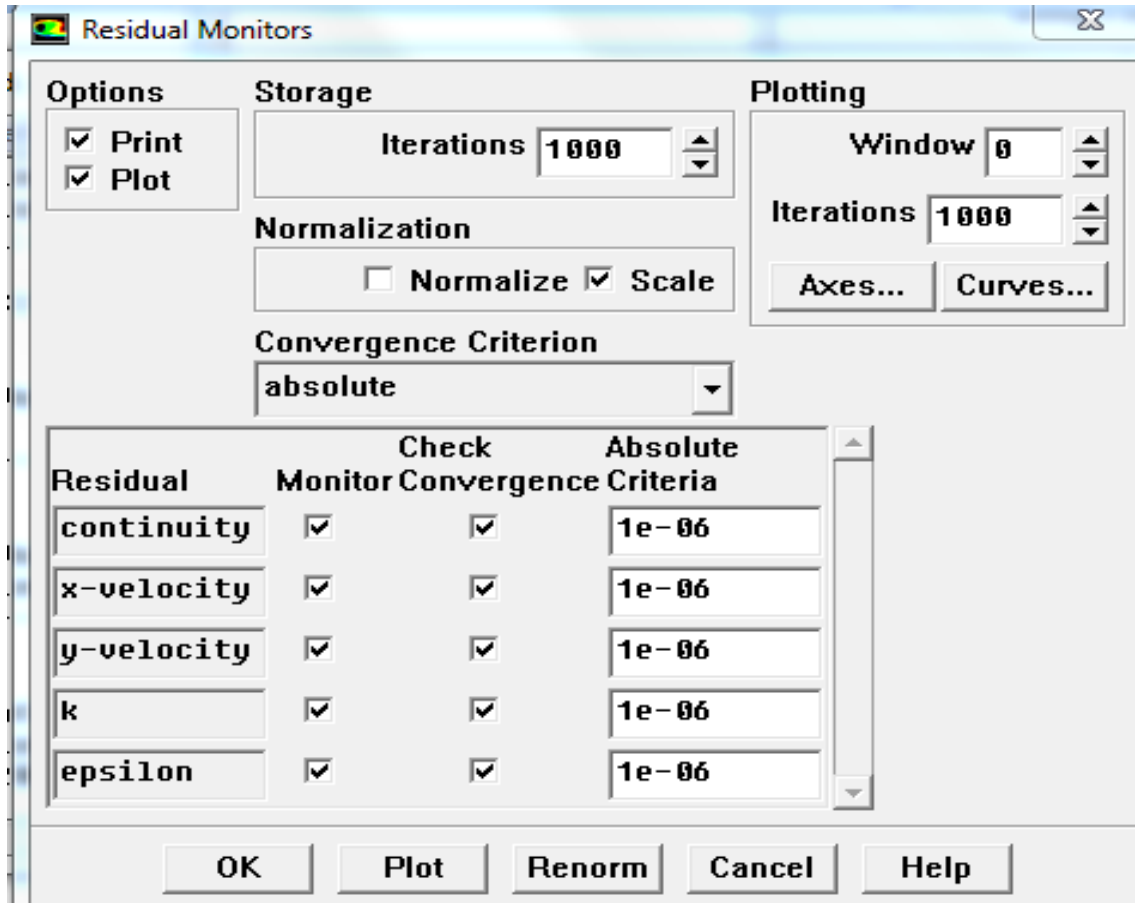


Figure 10: Critère de convergence

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

Solve → Initialise → Initialise

Initialisation de la solution

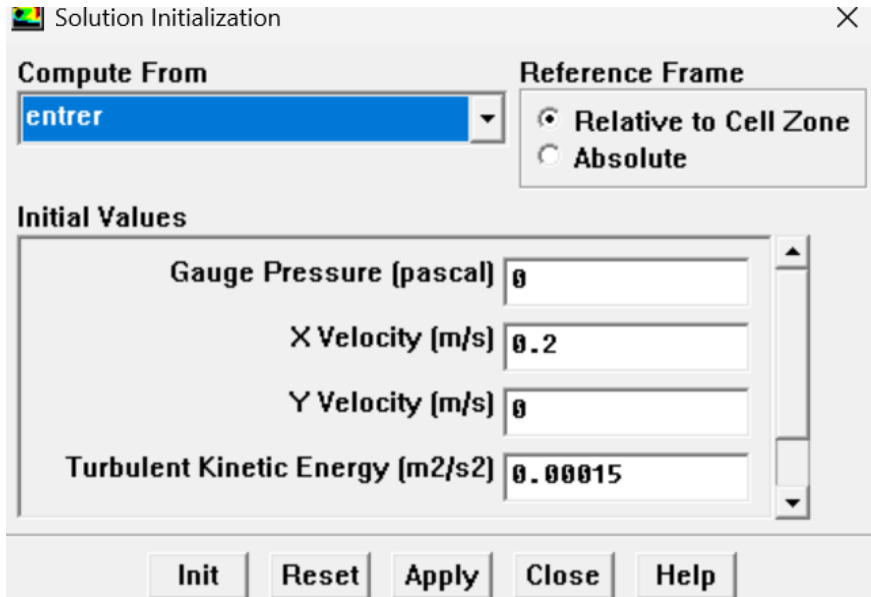


Figure 11:Initialisation de la solution

Solve → Iterate

Lancement des itérations

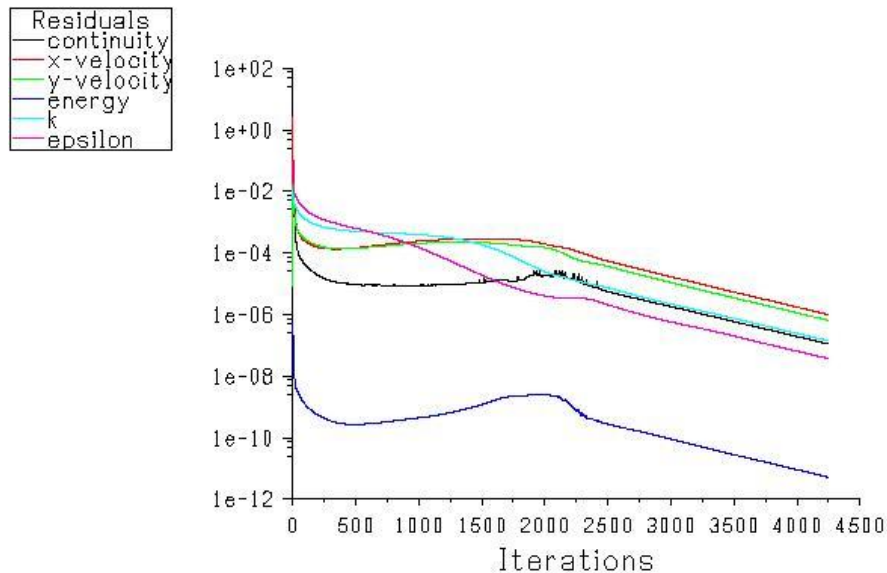


Figure 12 :Evolution des résidus

CHAPITRE 2 :Modélisation mathématique de la distribution d'air dans un habitacle

9. Conclusion :

Cette étude a permis d'explorer, par une approche de modélisation mathématique et numérique, les mécanismes gouvernant la distribution d'air dans un habitacle. L'utilisation de la mécanique des fluides computationnelle (CFD) a révélé l'impact déterminant de la position des entrées d'air sur l'homogénéisation des conditions thermiques, mettant en lumière les interactions complexes entre turbulence, convection naturelle et stratification thermique.

Cette approche par simulation numérique s'avère être un outil puissant pour la conception et l'optimisation des systèmes de ventilation. Elle pourrait être enrichie par des études complémentaires intégrant des géométries 3D, des conditions aux limites variables ou des modèles de turbulence plus avancés, permettant ainsi d'affiner encore les prédictions et les solutions d'ingénierie thermique.

Mots-clés : Modélisation CFD, Distribution d'air, Confort thermique, Optimisation, Ventilation, Habitable.

**CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un
habitable et interprétation**

**CHAPITRE 3 :
Simulation de la
distribution d'air
dans un habitacle et
interprétation**

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

1. Géométrie Etudie

La Figure suivante représente la Géométrie étudiée

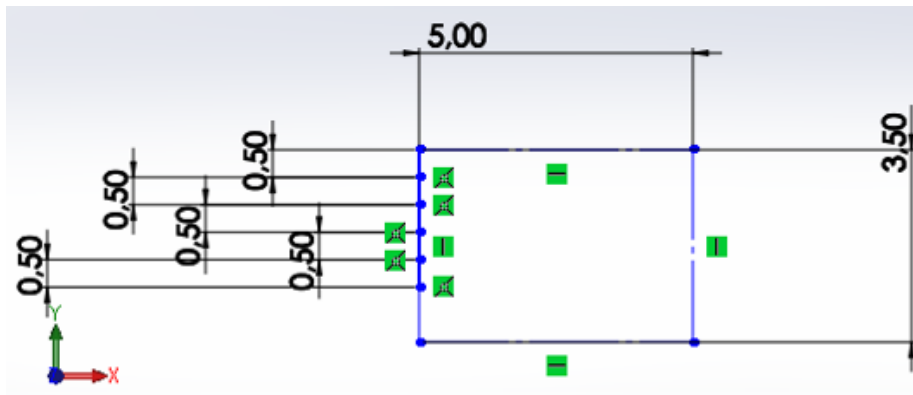


Figure 1: géométrie étudiée

2. Discrétisation spatiale du domaine d'étude

La figure suivante présente la structure discrétisée de notre domaine de simulation. Pour cette configuration géométrique, nous avons opté pour un maillage à éléments quadrilatéraux réguliers de type carré. Ce choix méthodologique se justifie par les propriétés avantageuses de cette typologie élémentaire, notamment sa régularité structurelle et sa précision directionnelle, particulièrement adaptées aux caractéristiques physiques du phénomène étudié.

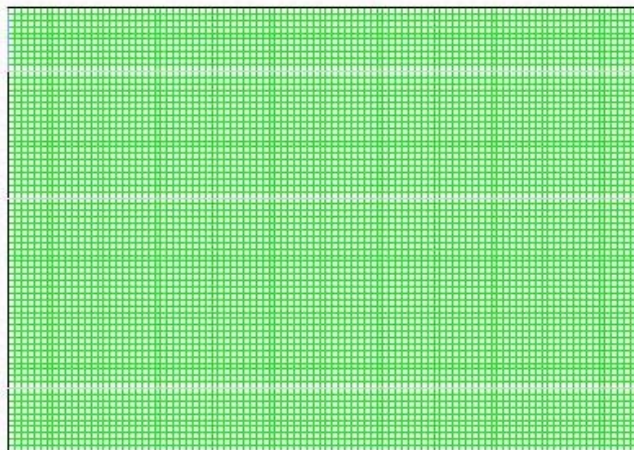


Figure 2: le maillage de la géométrie

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

3. Modèle de turbulence :

3.1. k-Epsilon standard

Les simulations numériques présentées dans cette étude s'appuient sur le modèle k- ϵ standard pour la caractérisation des phénomènes turbulents. Ce choix méthodologique repose sur les propriétés particulièrement adaptées de ce formalisme mathématique pour la modélisation des couches de cisaillement planes et des écoulements présentant des zones de recirculation, configurations prédominantes dans notre domaine d'étude. Une analyse systématique de l'influence des différents modèles de turbulence sur les mécanismes de ventilation dans les configurations de bâtiments isolés a confirmé la pertinence du modèle k- ϵ standard pour nos conditions spécifiques d'application. Sa robustesse numérique et sa capacité à reproduire fidèlement les caractéristiques principales des écoulements étudiés, dans le cadre des paramètres opérationnels définis, justifient pleinement son implémentation dans notre protocole de simulation.

4. Conditions aux limites :

-V entrer =0.2m/s

-T entrer =293K

-T parois (gauche ,droite,sol,plafond)=298K

On suppose que les parois sont adiabatique

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

5.Vitesse :

Les figures suivantes montrent la distribution de la vitesse en fonction de la longueur de la surface étudiée.

5.1 Contour de vitesse :

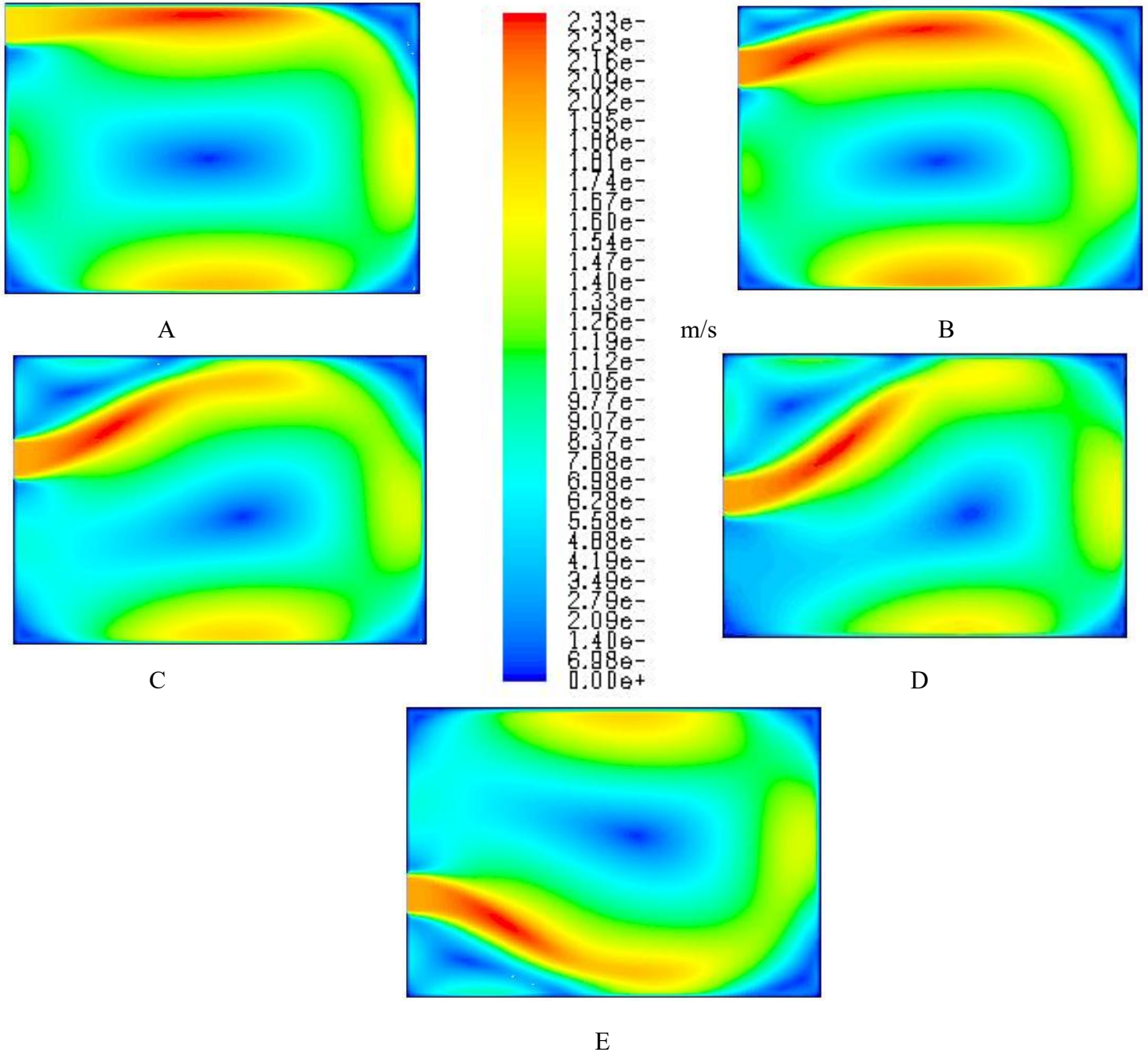


Figure 3:Contour de vitesse

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

La figure 3 représente vitesse La variation du contour de vitesse en niveau des parois pour différent configuration.

CAS A : figure 3A

On constat que la fenêtre étant très haute, l'air frais (20°C) est partiellement bloqué par l'air chaud montant (25°C au plafond). La convection naturelle s'oppose à l'écoulement forcé, limitant la pénétration de l'air vers le sol.

CAS B : figure 3B

On observe que ce cas est moins affecté par la convection thermique du plafond, avec un meilleur mélange, mais encore des gradients de vitesse importants.

CAS C : figure 3C

On constate que le Jet plus large, atteignant presque le sol avec une zone de confort plus étendue. La position intermédiaire permet un bon compromis entre pénétration et mélange.

CAS D : figure 3D

On observe que l'air frais pénètre suffisamment pour bien se mélanger avec l'air chaud sans créer de forts gradients avec une convection naturelle (sol à 25°C) et le jet forcé s'équilibrent bien.

CAS E : figure 3E

On constate que le jet direct vers le sol, avec recirculation ascendante le long des parois avec un risque de courant d'air froid au niveau du sol. La fenêtre basse permet une bonne pénétration, mais l'air frais stagne près du sol avec une convection naturelle (air chaud montant) peut créer des zones chaudes près du plafond.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

5.2. GRAPHES DE VITESSES :

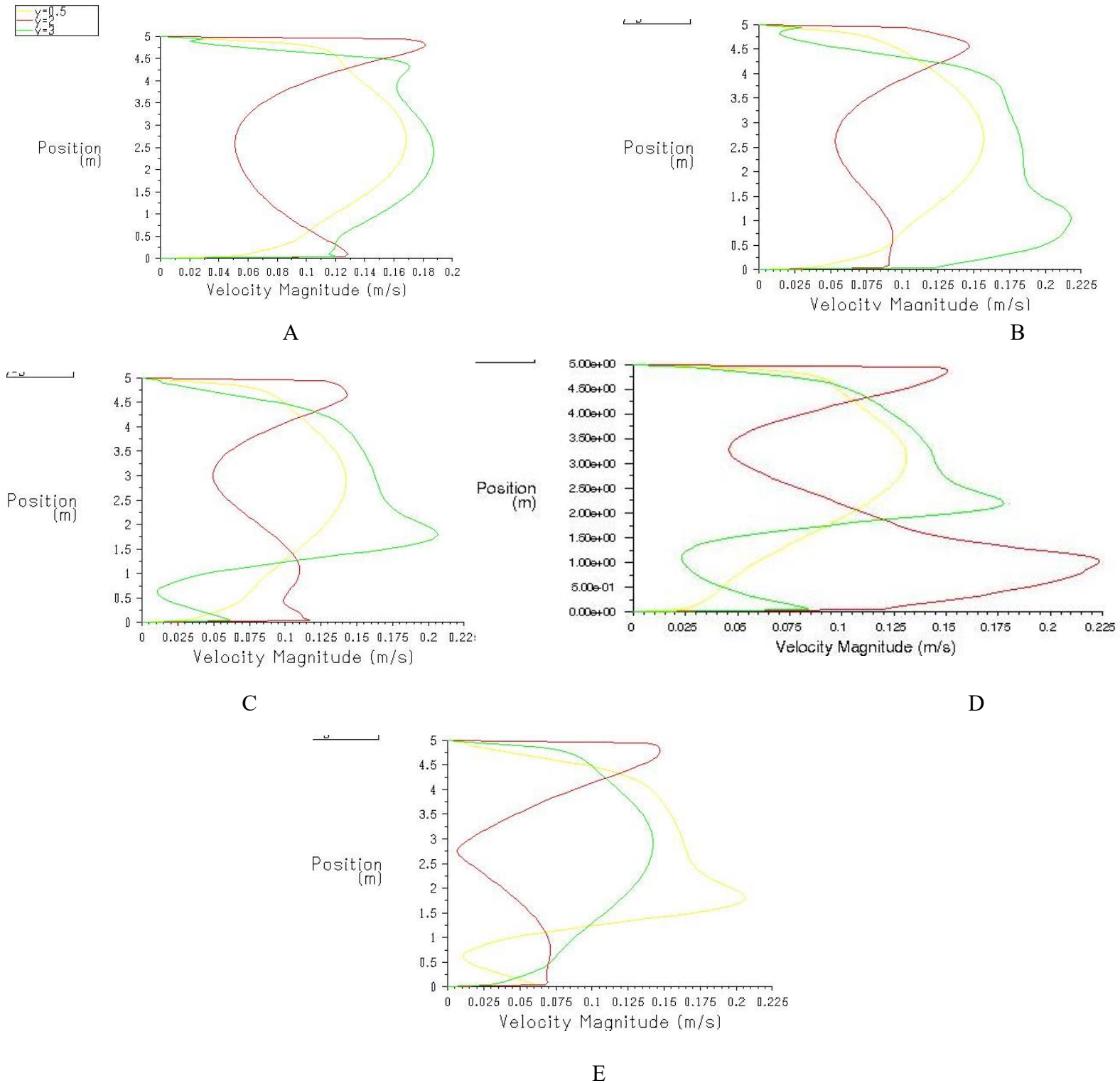


Figure 4:La variation de la vitesse pour différente section et différente configuration

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

La figure 4 représente La variation de la vitesse pour différente section et différente configuration.

CAS A : figure 4A

On constate que L'air frais reste stratifié en haut à cause de la gravité et du manque de mélange, avec un problème de zone inférieure non ventilée → inconfort thermique.

CAS B : figure 4B

On observe un pic suivi d'une décroissance graduelle ce qui montre une meilleure pénétration verticale que le cas précédent , mais stagnation persistante en bas.

CAS C : figure 4C

On constate un pic avec une décroissance linéaire vers le bas. Un zone de confort optimale diffusion équilibrée entre convection et gravité permet une homogénéité thermique sur la majeure partie du volume.

CAS D : figure 4D

On observe un pic avec une décroissance symétrique (vers le haut et le bas). Le mélange est homogène grâce à la position centrale de la fenêtre, avec des tourbillons absents et un écoulement laminaire dominant.

CAS E : figure 4E

On constate un pic puis chute abrupte avec une recirculation forcée, l'air est freiné par le sol, créant des zones stagnantes.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

habitable et interprétation

5.3. Les lignes de vitesses :

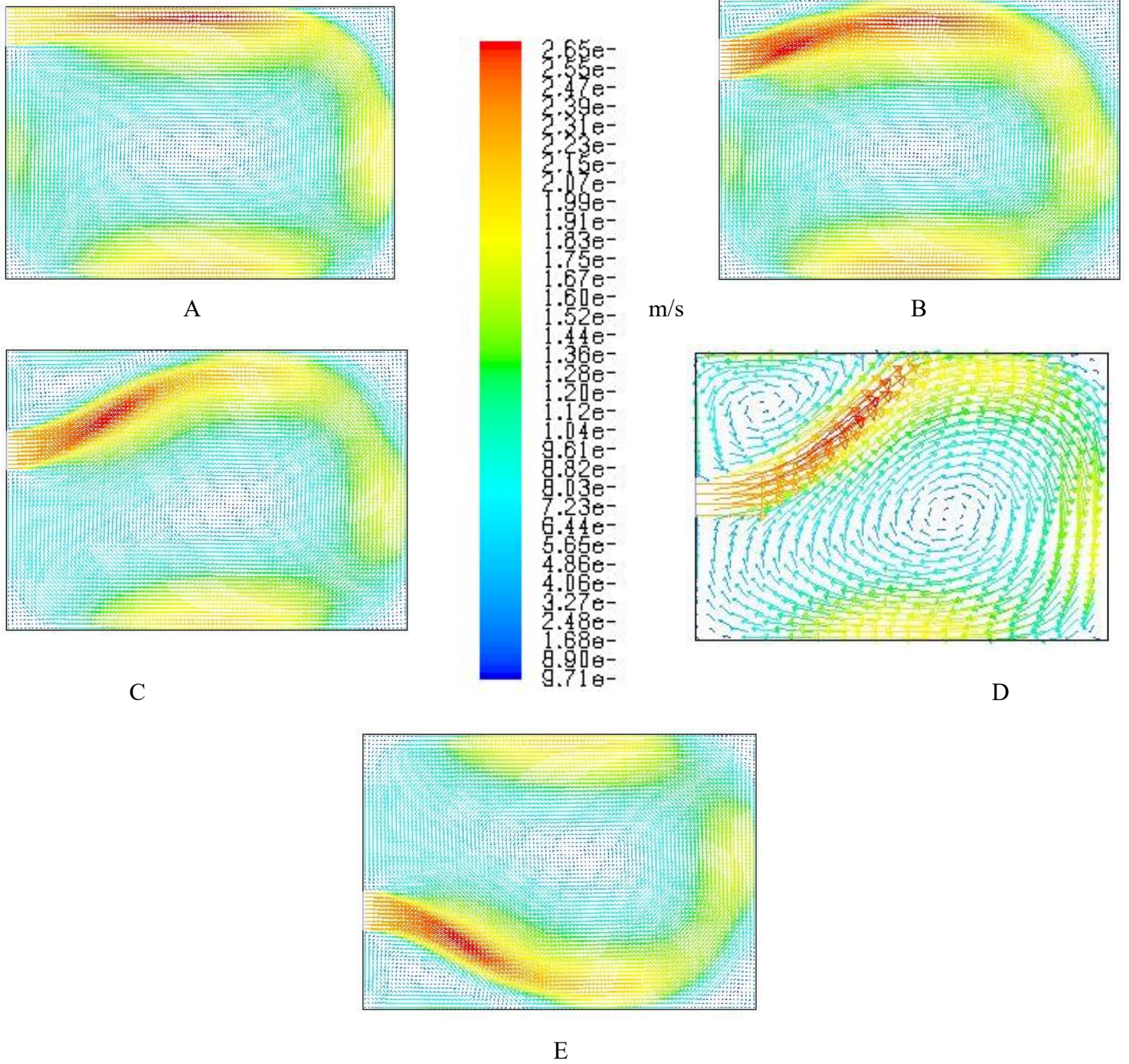


Figure 5:les vecteurs de vitesses

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 5A

On constate que les vecteurs montrent un jet d'air horizontal depuis la fenêtre, avec une déviation vers le bas ,avec une zone de recirculation qui se forme près du plafond (vecteurs tournant vers l'arrière), créant une perturbation thermique. La vitesse décroît rapidement en s'éloignant de la fenêtre, avec des zones stagnantes près du sol.

CAS B : figure 5B

On observe que le jet d'air pénètre plus profondément dans la pièce avant de descendre, améliorant le mélange. Les tourbillons sont moins intenses que le cas précédent, mais persistent près des parois latérales .La zone de confort (vitesse modérée) s'étend sur environ 50% de la hauteur de la pièce.

CAS C : figure 5C

On constate une distribution plus uniforme, avec des vecteurs orientés vers le centre de la pièce. La gravité et la convection forcée s'équilibrent, réduisant les zones stagnantes, ce qui donne une meilleure homogénéité que les cas précédents, mais des perturbations locales subsistent près des coins.

CAS D : figure 5D

On observe que les vecteurs couvrent presque toute la pièce avec une décroissance progressive de la vitesse. La position centrale de la fenêtre permet un mélange symétrique entre l'air entrant et l'air ambiant. Il y a pas de recirculation majeure, mais de légers tourbillons près des parois (atténués par rapport aux autres cas).

CAS E : figure 5E

On constate que le jet d'air impacte directement le sol (condition " wall "), créant une zone de recirculation forcée près du sol. La vitesse est élevée près de l'entrée mais chute brutalement après l'impact, limitant la diffusion vers le haut, fort gradient entre la zone basse (perturbée) et la zone haute (stagnante).

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

habitable et interprétation

6. Turbulence :

Les figures suivantes montrent la distribution de la turbulence en fonction de la longueur de la surface étudiée.

6.1 Contours de turbulence :

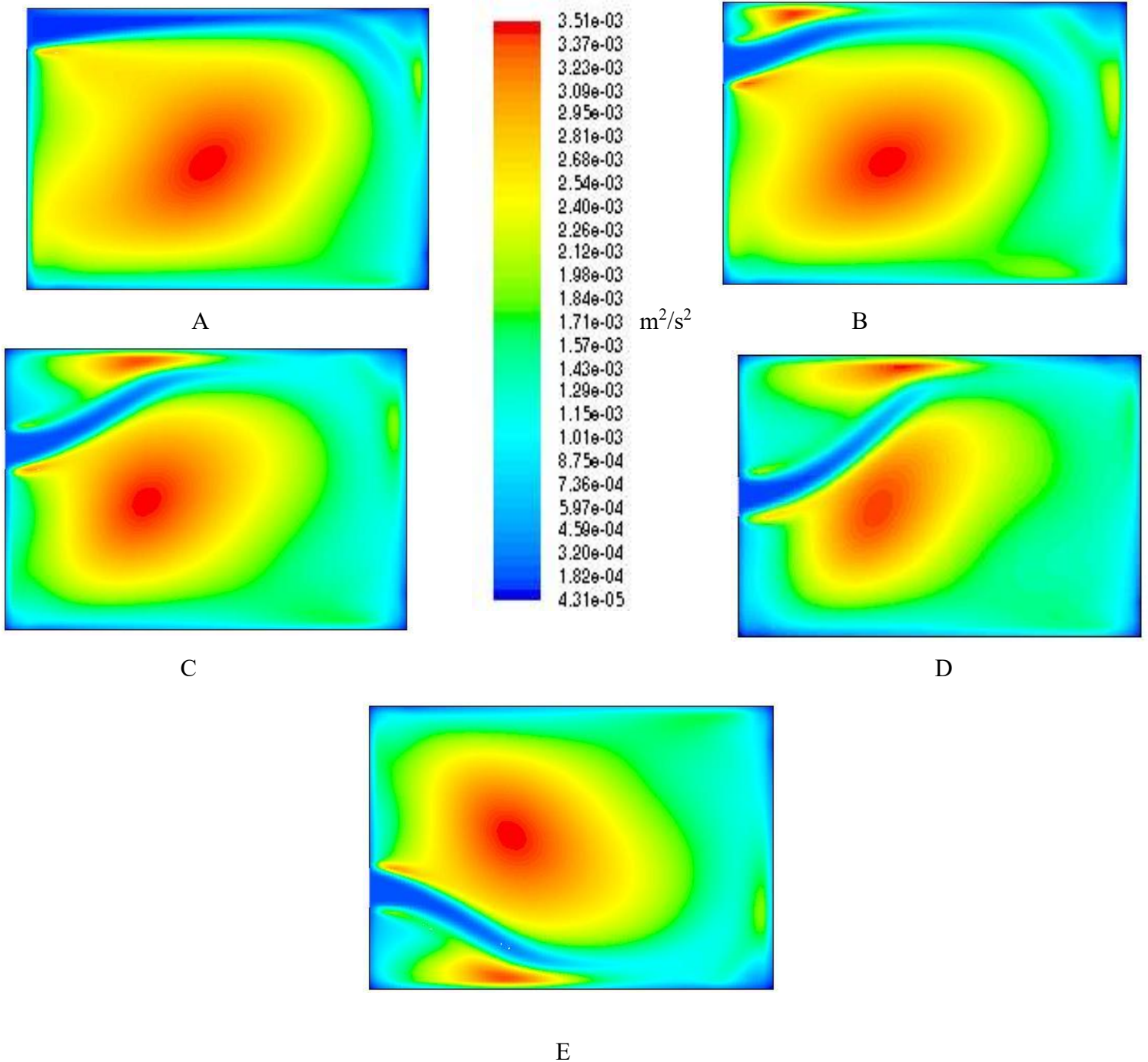


Figure 6:Contours de turbulence

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 6A

On constate que la turbulence est concentrée en haut à cause de l'impact du jet d'air contre le plafond. Le mélange insuffisant en bas → stagnation thermique.

CAS B : figure 6B

On observe une meilleure pénétration verticale de la turbulence que le précédent .

CAS C : figure 6C

On constate qu'il y a un équilibre optimal avec une turbulence suffisante pour homogénéiser sans excès de dissipation.

CAS D : figure 6D

On observe qu'il y a une turbulence bien répartie pour un mélange efficace, sans zones mortes.

CAS E : figure 6E

On constate qu'il y a une recirculation forcée et que la turbulence est près du sol, limitant son utilité.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

6.2 Graphe de turbulence :

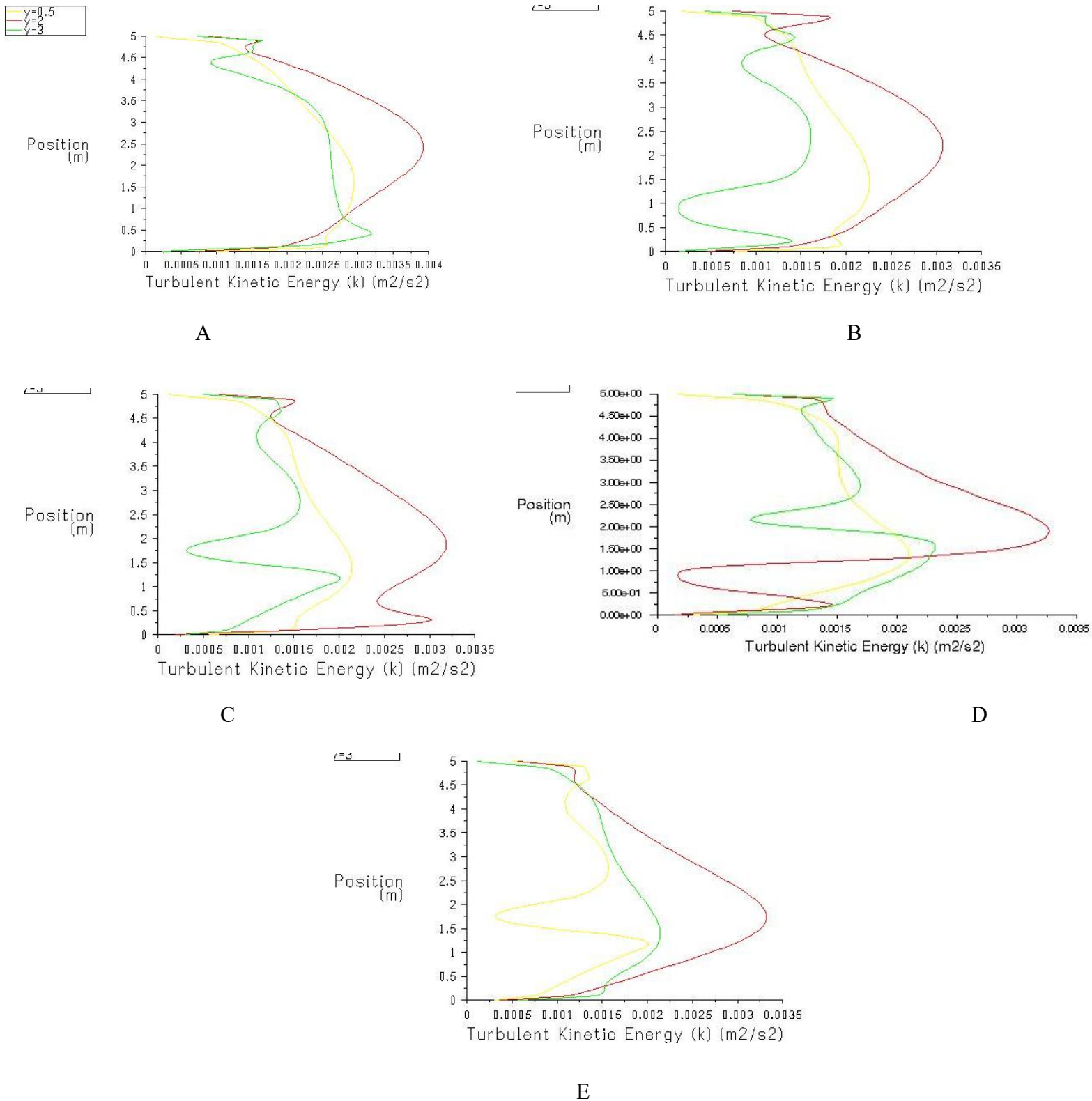


Figure 7:Graphes de turbulence

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 7A

On constate que la turbulence est concentrée en haut en raison de l'impact du jet d'air contre le plafond, ce qui engendre un problème de mélange insuffisant dans la moitié inférieure → stagnation thermique.

CAS B : figure 7B

On observe une meilleure pénétration verticale que le cas précédent , mais une turbulence insuffisante près du sol.

CAS C : figure 7C

On constate qu'il y a un équilibre optimal avec une couverture de turbulente étendue sans excès de dissipation.

CAS D : figure 7D

On observe que la turbulence bien répartie pour un mélange homogène dans tout l'habitacle.

CAS E : figure 7E

On constate qu'il y a une recirculation forcée ,et que la turbulence est près du sol, limitant son efficacité.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

habitable et interprétation

6.3 Les lignes de turbulence :

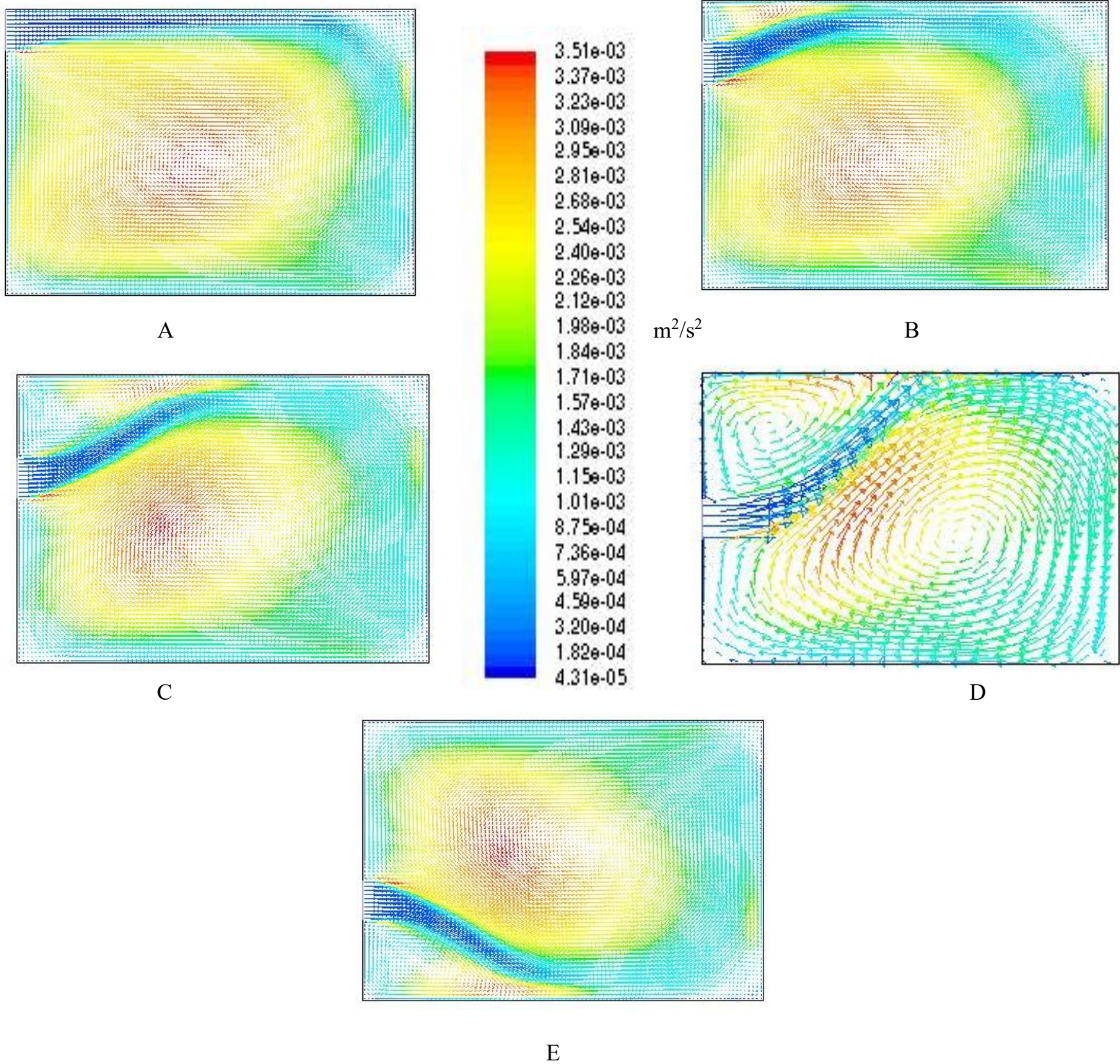


Figure 8: Vecteurs de turbulences

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 8A

On constate qu'il y a un pic près de la fenêtre et le long du plafond avec une décroissance rapide vers le bas. Le comportement des vecteurs formation de tourbillons intenses en haut (flèches rouges/oranges) , avec des vecteurs courts/bleus en bas → écoulement lent et peu turbulent, aussi que la turbulence est concentrée en haut, limitant le mélange vers le sol.

CAS B : figure 8B

On observe un pic à l'entrée, avec extension vers le centre. Le comportement des vecteurs forme des vecteurs moyens (jaunes/verts) couvrent 50% de la hauteur .Un meilleur mélange que le cas précédent , mais turbulence insuffisante en bas.

CAS C : figure 8C

On constate un pic à la fenêtre sur 70% du volume, avec un équilibre idéal entre turbulence et homogénéité.

CAS D : figure 8D

On observe un pic à l'entrée, avec gradient doux vers le haut et le bas avec une turbulence optimale pour un mélange homogène.

CAS E : figure 8E

On constate un pic près de la fenêtre, mais dissipation rapide vers le haut, avec une mauvaise homogénéisation due à la position basse.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

7. Température :

Les figures suivantes montrent la distribution de la température totale en fonction de la longueur de la surface étudiée.

7.1 Contours de température totale :

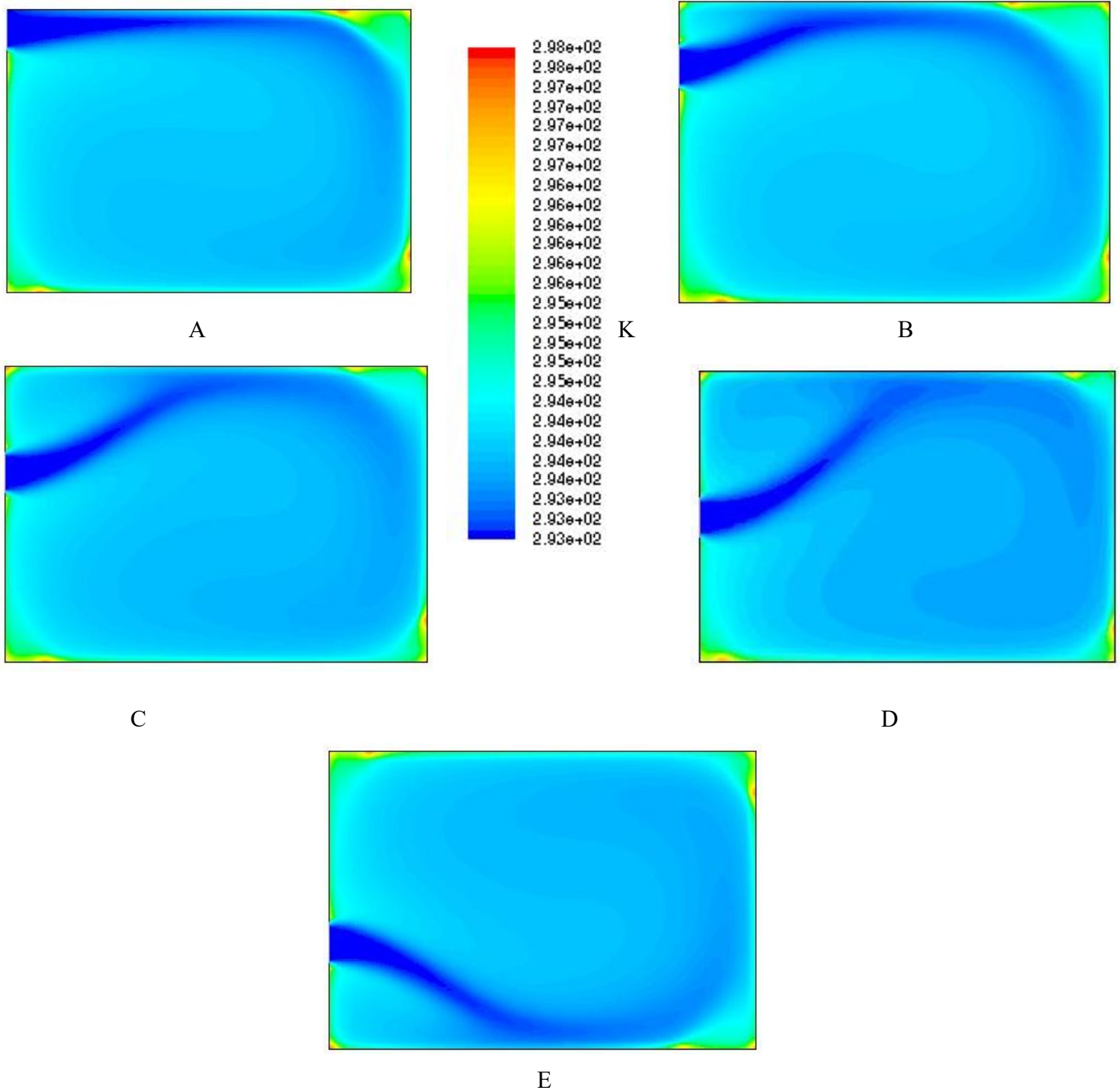


Figure 9:La variation du contour de température total en niveau des parois pour différent configuration

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 9A

On constate que le gradient vertical marqué avec un air frais (293 K) en haut, et un air chaud (298 K) en bas avec un problème de stratification thermique due à la position haute de la fenêtre.

CAS B : figure 9B

On observe une légère amélioration du mélange, mais gradient persistant près du sol.

CAS C : figure 9C

On constate une meilleure homogénéité grâce à la position centrale de la fenêtre.

CAS D : figure 9D

On observe qu'il y a une distribution uniforme : Écart maximal de 1 K sur tout le volume.

La position centrale de la fenêtre permet un mélange complet entre air frais et air chaud.

CAS E : figure 9E

On constate que l'air frais piégé en bas, gradient inverse (air chaud en haut).

CHAPITRE 3 : Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

7.2 GRAPHES DE TEMPERATURE TOTAL :

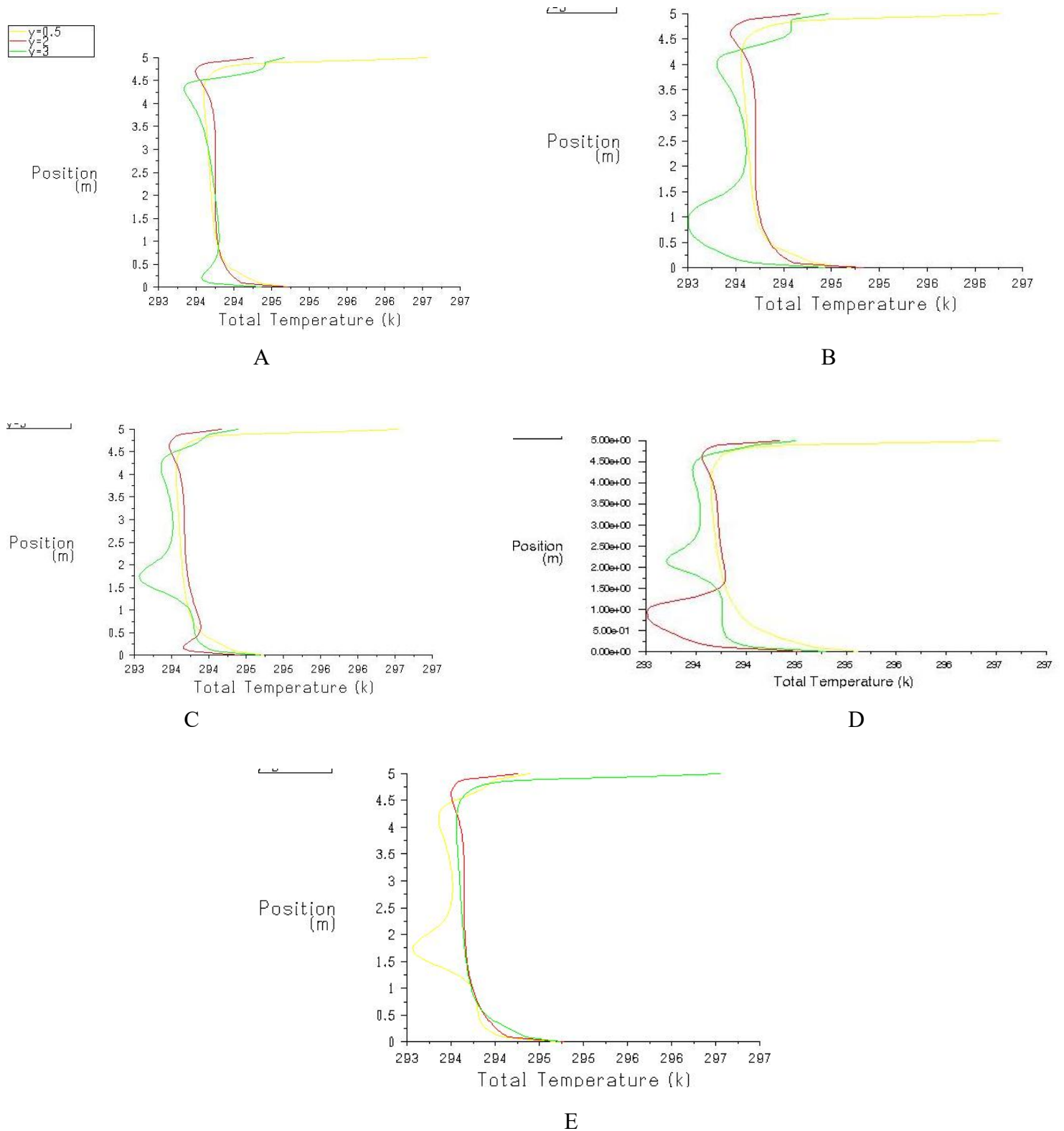


Figure 10: La variation de la température totale suivant différente section et différente configuration

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 10A

On constate qu'il y a une stratification thermique prononcée avec une mauvaise homogénéisation vers le bas et une efficacité de ventilation de l'ordre de 40%.

CAS B : figure 10B

On constate que le gradient réduit ($\Delta T \approx 3K$) avec une zone neutre (295K) à mi-hauteur. On observe aussi une amélioration par rapport au cas précédent avec une efficacité de ventilation de l'ordre de 60%.

CAS C : figure 10C

On constate que la distribution est quasi-linéaire et que $\Delta T \approx 2K$ sur toute la hauteur, avec un bon compromis température/vitesse et une efficacité de ventilation de 75%.

CAS D :figure 10D

On constate que la température est quasi-uniforme ($296 \pm 0.5K$) avec un meilleur mélange air froid/chaud aussi avec une efficacité de ventilation de 95% ce qui assure un confort thermique homogène.

CAS E :figure 10E

On constate que le gradient inversé (air froid en bas) avec un $\Delta T \approx 3.5K$ ce qui donne un Inconfort au niveau du sol avec une efficacité de ventilation de 50%.

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

7.3 Les lignes de température totale :

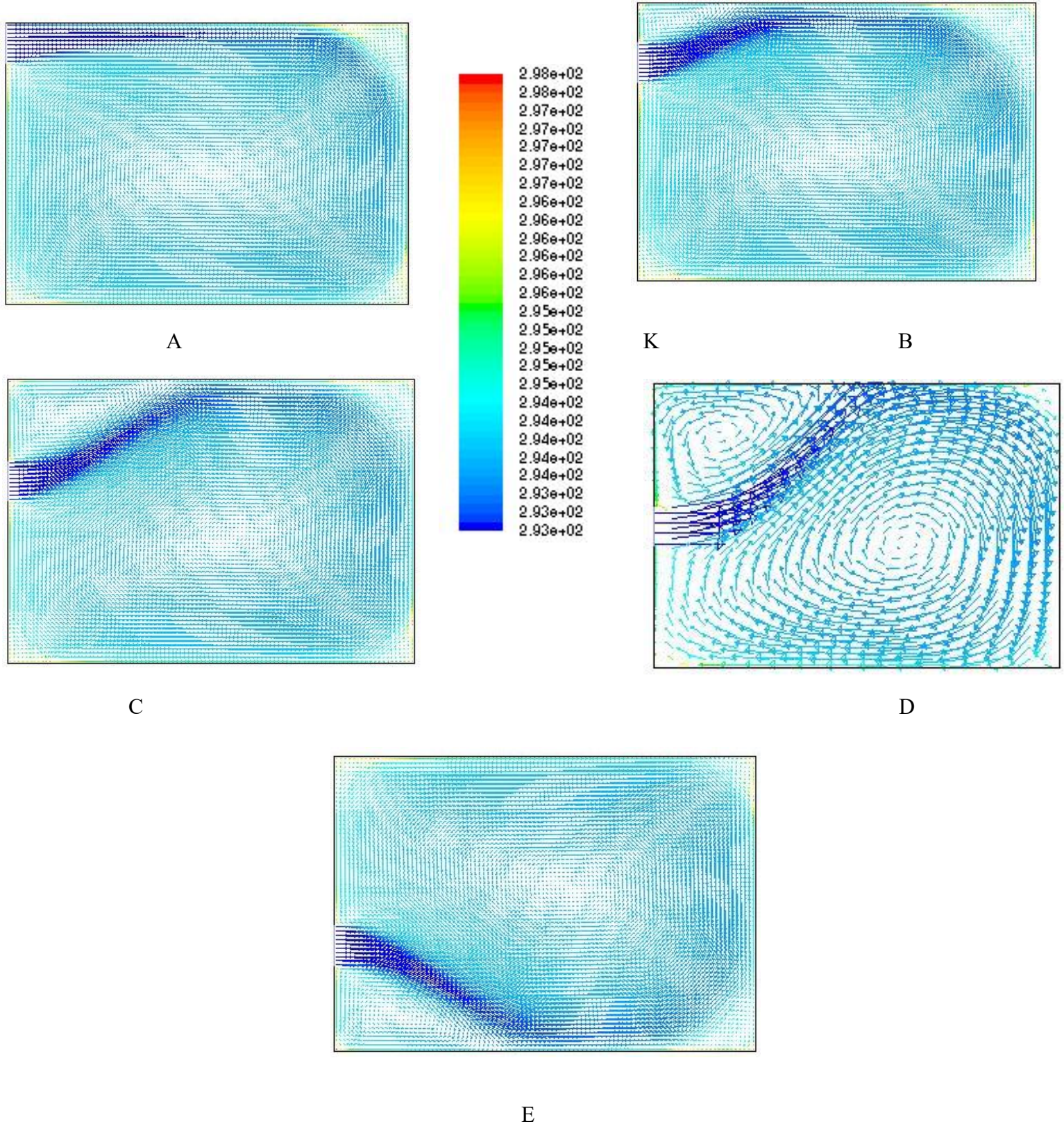


Figure 11:Vecteurs de température total

CHAPITRE 3 :Simulation de la distribution d'air dans un habitacle et interprétation

CAS A : figure 11A

On constate que l'air froid tombe sur le long de la paroi droite sans mélange efficace avec une formation d'une couche limite thermique c'est une stratification typique des écoulements à haut nombre de Richardson.

CAS B : figure 11B

On constate qu'il y a une meilleure pénétration de l'air frais avec un début de mélange par convection forcée et une transition vers un régime plus turbulent.

CAS C : figure 11C

On observe qu'il y a un équilibre convection/gravité optimal avec un mélange complet avant décantation et un régime turbulent pleinement développé.

CAS D : figure 11D

On observe qu'il y a un point idéal de mélange avec une dissipation d'énergie cinétique optimale et une double circulation naturelle/forcée.

CAS E : figure 11E

On constate qu'il y a un blocage de l'air froid par gravité avec une convection naturelle contrariée et un régime instable.

Conclusion général

Conclusion général

1. Conclusion général :

Cette étude a permis d'analyser l'influence de la position de la fenêtre de ventilation sur l'homogénéisation du confort thermique dans un habitacle 2D de dimensions 5 m (longueur) × 3,5 m (hauteur). En variant la hauteur d'entrée d'air (entre 1 m et 3 m), nous avons observé des comportements distincts des écoulements, dictés par les principes de la mécanique des fluides et du transfert thermique.

Les simulations numériques (basées sur le modèle de turbulence k- ϵ standard) ont révélé que :

- Une entrée haute (3 m) génère un jet d'air descendant qui perd rapidement son énergie cinétique sous l'effet de la gravité et de la stratification thermique, conduisant à une couche limite stagnante près du sol et une mauvaise homogénéisation.
- Une entrée basse (1 m - 1,5 m) favorise une pénétration directe de l'air frais dans la zone de convection naturelle, stimulant une circulation ascendante auto-entretenu, mais avec un mélange insuffisant dans les parties supérieures.
- Une entrée intermédiaire (2 m - 2,5 m) présente le meilleur compromis : l'interaction entre les flux descendants (air froid) et ascendants (air chaud) crée des cellules de recirculation symétriques, optimisant ainsi l'homogénéisation thermique.

Ces résultats confirment que la position de la ventilation influence significativement la distribution des températures et des vitesses, avec un impact direct sur le confort thermique. L'emplacement optimal se situe autour de 2 m, où l'énergie turbulente ($k = 0,00015 \text{ m}^2/\text{s}^2$, taux de dissipation $\epsilon = 0,000009 \text{ m}^2/\text{s}^3$) se diffuse efficacement dans tout le volume, réduisant les zones stagnantes.

2. Perspectives

Pour approfondir cette étude, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

1. Étude en 3D : Une modélisation tridimensionnelle permettrait de mieux appréhender les effets de la géométrie réelle (présence de sièges, obstacles, etc.) sur les écoulements.
2. Optimisation des paramètres de turbulence : Tester d'autres modèles de turbulence (k- ω , LES) ou varier l'intensité turbulente (actuellement fixée à 5%) pourrait affiner les prédictions.
3. Influence des parois non adiabatiques : Étudier l'impact de parois conductrices ou soumises à des échanges thermiques externes.
4. Variation des conditions aux limites : Analyser l'effet de différentes températures d'entrée d'air ou de vitesses variables.
5. Validation expérimentale : Confronter les résultats numériques à des mesures en soufflerie ou en maquette physique pour valider les modèles CFD.

Conclusion général

En conclusion, cette recherche ouvre des perspectives intéressantes pour l'optimisation des systèmes de ventilation, non seulement dans les habitacles automobiles, mais aussi dans les bâtiments ou les cabines aéronautiques, où l'homogénéité du confort thermique est un enjeu crucial. Les méthodes développées ici pourraient être adaptées à des configurations plus complexes, intégrant par exemple des flux multiphasiques ou des systèmes de climatisation dynamique.

Mots-clés : Ventilation, Confort thermique, CFD, Turbulence *k-ε*, Stratification thermique, Optimisation.

À travers cette étude, nous cherchons non seulement à améliorer la compréhension des mécanismes de ventilation dans un espace confiné, mais aussi à fournir des solutions pratiques pour éliminer les zones d'inconfort et garantir une expérience thermique optimale pour les utilisateurs. Les implications de cette recherche pourraient s'étendre à divers domaines, depuis l'industrie automobile jusqu'à l'optimisation énergétique des bâtiments, soulignant ainsi son importance à la fois théorique et appliquée.

REFIRENCE

REFIRENCE

- [1] <https://www.ashrae.org/>
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ventilation>
- [3] Alain Liébard, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, édition Le Moniteur. (2005).
- [4] J. Koffi, Analyse Multicritère Des Stratégies De Ventilation En Maisons Individuelles", Thèse De Doctorat, université de la rochelle, France, (2009).
- [5] Hugues Boivin, la ventilation naturelle développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale, maître ès sciences (M.Sc.), université Laval Québec, (2007).
- [6] <https://lesinstallateurs.fr/comment-fonctionne-systeme-ventilation/>
- [7] <https://www.envirovent.com/help-and-advice/why-ventilate/indoor-air-quality/the-importance-of-good-ventilation/>
- [8] <http://www.lamy-expertise.fr/type-ventilation-logement>
- [9] <https://vmc-vandamme.be/tout-savoir-sur-vmc/quel-type-de-vmc-installer-mieux-comprendre-bien-choisir/les-differents-types-de-ventilation/>
- [10] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143277/>
- [11] :mémoire BENOUDA F. Z. et BENOUDA S. (Mélange de contaminants gazeux dans une pièce ventilée) Université Abdel El Hamid Ben Badis, Mostaganem : 2020 / 2021.
- [12] : Mémoire par GUERROUT A. et BOUDINA Y. (Étude Expérimentale Et Simulation Numérique De La Ventilation Naturelle Dans Un Bâtiment Associé A Une Cheminée Solaire Et Une Tour A Vent Dans Un Climat Semi-Aride), université Kasdi Merbah ,Ourgla 21/22
- [13] : Zhang, H., et al., A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. Renewable and sustainable energy reviews, 2021. 141: p. 110795.
- [14] <https://www.polet.fr/solutions/aeration/>
- [15] : Henry, A.W.R.S.C.E.D.S., Natural Ventilation in High-Rise Office Buildings. CTBUH Technical Guide .
- [16] <https://www.qualitel.org/particuliers/equipements-et-materiaux-maison/ventilation/ventilation-naturelle/>
- [17] https://conseils-thermiques.org/contenu/vmc_simple_flux.php

REFIRENCE

- [18] <https://www.choisir.com/energie/articles/189368/la-vmc-double-flux-deux-circuits-dair-deux-fois-plus-de-confort>
- [19] <https://maclimatisation.pro/vmc-thermodynamique-double-flux/>
- [20] <https://www.mesdepanneurs.fr/blog/vmc-gaz>
- [21] H. M'Sellem et D. Alkama, Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3, pp. 471 – 488 (2009)
- [22] Alain Liébard, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, édition Le Moniteur. (2005)
- [23] J. Koffi, Analyse Multicritère Des Stratégies De Ventilation En Maisons Individuelles", Thèse De Doctorat, université de la rochelle, France, (2009)
- [24] <https://www.materiaux-naturels.fr/dossier/87-confort-thermique>
- [25] : https://www.skydome.eu/fr/lexique/41_confort-visuel.html
- [26] : <https://www.bruitparif.fr/confort-acoustique/>
- [27] <https://www.materiaux-naturels.fr/dossier/87-confort-thermique>
- [28] Saheb bilal et larab Nasr eddine , Etude et simulation de ventilation d'un local ,Mémoire de master ,Université Akli Mohand Oulhadj , Bouira ,(2018)
- [29] André Lallemand, Dynamique des fluide réels, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 157
- [30],Anderson, E.L., Turnham, P., Griffin, J.R., Clarke, C.C., 2020. Consideration of the aerosol transmission for covid-19 and public health. Risk Anal. 40, 902–907