REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie



Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

THEME

Contribution à l'étude du confort thermique dans une unité d'industrie médicale

Présenté par :

Mme Sara DAHAL

Proposé et dirigé par :

Prof. Mounir ZIRARI

Prof. Younes CHIBA

Année anniversaire 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous voudrions remercier ALLAH Tout- Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour compléter notre formation académique et nous permettre de faire ce travail de recherche, et nous tenons à exprimer nos sincères remerciements. Aux promoteurs,

Prof ZIRARI Mounir, Prof CHIBA Younes et à la Confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour leur intérêt.

Dédicaces

Je dédie cet humble acte

A ma mère, et merci à ALLAH de l'avoir protégée en m'amenant ici

A mes chers frères, mon mari et mes enfants

Pour toute ma famille sans exception

À tous les enseignants qui m'ont aidé à atteindre cette plateforme

DAHEL SARRA

ملخص

يهدف هذا المشروع الدراسي إلى دراسة الراحة الحرارية في وحدة صناعية طبية. لتحقيق ذلك، يتم تحليل معايير الراحة للمقيمين مع مراعاة سرعة الهواء، الرطوبة النسبية، نقاء الهواء، درجة الحرارة المحيطة وانتشار الملوثات، فيما يتعلق بصحة المرضى والموظفين. تُستخدم معادلات كمية الحركة لنافيير-ستوكس ومعادلات الطاقة للتنبؤ بمجالات السرعة ودرجة الحرارة في نقاط مختلفة من الوحدة الطبية، باستخدام أداة محاكاة عددية CFD. الهدف هو ضمان راحة مثلى. ثم يتم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها.

الكلمات المفتاحية: الراحة الحرارية، أداة CFD، المحاكاة العددية، انتشار الملوثات

Résumé

Ce projet de master consiste à étudier le confort thermique dans une unité industrielle médicale. Pour ce faire, les paramètres de confort des occupants sont analysés en tenant compte de la vitesse de l'air, de l'humidité relative, de la pureté de l'air, de la température ambiante et de la dispersion des polluants, en lien avec la santé des patients et des employés. Les équations de quantité de mouvement de Navier-Stokes et les équations de l'énergie sont utilisées pour prédire les champs de vitesse et de température en différents points de l'unité médicale, grâce à un outil de simulation numérique CFD. L'objectif est d'assurer un confort optimal. Les résultats obtenus sont ensuite analysés et discutés.

Mots clés : Confort thermique, Outil CFD, Simulation numérique, Dispersion des polluants

Abstract

This master's project aims to study thermal comfort in a medical industrial unit. To achieve this, the comfort parameters of the occupants are analyzed, taking into account air velocity, relative humidity, air purity, ambient temperature, and pollutant dispersion, in relation to the health of patients and employees. The Navier-Stokes momentum equations and energy equations are used to predict the velocity and temperature fields at various points in the medical unit, utilizing a CFD simulation tool. The goal is to ensure optimal comfort. The results obtained are then analyzed and discussed.

Keywords : Thermal comfort, CFD tool, Numerical simulation, Pollutant dispersion.

TABLEAU DE MATIÈRE :

INTRODUCTION GENERALE 1
I .Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique 2
I.1 Introduction 3
I.2 Facteurs affectant le confort thermique 4
I.2.1 Température de l'air 4
I.2.2 Humidité 4
I.2.3 Mouvements d'air 4
I.2.4 Rayonnement thermique 4
I.3 Approches pour améliorer le confort thermique 4
I.3.1 Conception bioclimatique 4
I.3.2 Isolation et étanchéité 4
I.3.3 Systèmes CVC efficaces 4
I.4 Les transferts de chaleur qui influent sur le confort thermique 5
I.5 La répercussion de la circulation d'air au confort des occupants 5
I.6 Effets thermiques 6
I.6.1 Effet dû à la conduction 6
I.6.2 Effet dû à la convection 6
I.6.3 Effet dû à la radiation 7
I.6.4 Effet dû à l'humidité 7
I.6.5 Effet métabolique 8
I.7 Bilans thermiques 9
I.7.1 Bilan global 10
I.8 La plage de confort thermique 10
I.8.1 Température 10
I.8.1.1 Température de confort 11
I.8.1.2 Limite inférieure de confort 11
I.8.1.3 Limite supérieure de confort 11
I.8.2 Humidité 11
I.8.2.1 Plage de confort d'humidité relative 11
I.8.2.2 Limite inférieure de confort 12
I.8.2.3 Limite supérieure de confort 12
I.9 Etat de l'art 12
I.10 Conclusion 15

II. Chapitre II: Humidification, ventilation et climatisation..... 16
II.1 Introduction..... 17
II.2 Humidification..... 17
II.2.1 Définition..... 17
II.2.2 Types de systèmes d'humidification..... 17
II.2.2.1 Humidificateurs à vapeur..... 17
II.2.2.2 Humidificateurs à évaporation..... 18
II.2.2.3 Humidificateurs ultrasoniques..... 18
II.2.3 Sélection et dimensionnement du système d'humidification..... 19
II.2.3.1 Calcul des besoins en humidification..... 19
II.2.3.2 Analyse des coûts et de l'efficacité énergétique..... 19
II.2.4 Conception et installation du système d'humidification..... 19
II.2.4.1 Emplacement des humidificateurs..... 19
II.2.4.2 Contrôle et régulation..... 19
II.3 Ventilation..... 19
II.3.1 Définition..... 19
II.3.2 Types de systèmes de ventilation..... 19
II.3.2.1 Ventilation naturelle..... 19
II.3.2.2 Ventilation mécanique simple flux..... 20
II.3.2.3 Ventilation mécanique double flux..... 21
II.3.3 Composants des systèmes de ventilation..... 21
II.3.3.1 Ventilateurs..... 21
II.3.3.2 Conduits..... 21
II.3.3.3 Grilles et diffuseurs..... 21
II.3.4 Considérations de conception..... 21
II.3.4.1 Calcul des charges de ventilation..... 22
II.3.4.2 Disposition des conduits..... 22
II.3.4.3 Contrôle et régulation..... 22
II.4 Climatisation..... 22
II.4.1 Définition..... 22
II.4.2 Conception d’un système de climatisation..... 23
II.4.2.1 Évaluation des besoins..... 23
II.4.2.2 Sélection du système..... 23
II.4.2.3 Conception des composants..... 24
II.4.2.4 Dimensionnement des équipements..... 24
II.4.2.5 Conception du système de distribution d'air..... 24
II.4.2.6 Intégration des contrôles..... 24

II.4.2.7 Évaluation de l'efficacité énergétique 24
II.5 Conclusion 24
III Chapitre III : Méthodologie et modèle mathématique 25
III .1 Introduction 26
III.2 Équation gouvernantes 26
III.2.1 Modèle de turbulence 26
III.2.2 Élément polluant 29
III.3 ANSYS 30
III.3.1 Prétraitement 30
III.3.1.1 Importation de la géométrie 30
III.3.1.2 Génération de maillage 31
III.3.1.3 Conditions aux limites 31
III.3.2 Configuration du solveur 32
III.3.2.1 Choix du solveur 32
III.3.2.2 Configuration du modèle 32
III.3.2.3 Paramètres du solveur 33
III.3.3 Solution 33
III.3.3.1 Initialisation 33
III.3.3.2 Lancer la simulation 33
III.3.3.3 Post-traitement 33
III.3.4 Analyse 33
III.3.4.1 Interprétation des résultats 33
III.3.4.2 Validation 34
III.3.4.3 Analyse de sensibilité 34
III.4 Caractéristique de l'étude 34
III.4.1 Géométrie (Domaine du contrôle) 34
III.4.2 Configuration du maillage 35
III.4.2.1 Méthode des éléments finis 35
III.4.2.2 Optimisation du Maillage 36
III.4.3 Condition aux limites 37
III .5 Conclusion 38

Chapitre IV : Résultats et discussion 39
IV.1 Introduction 40
IV.2 Discussion des résultats 40
IV.2.1 Discussion des résultats du premier cas 41
IV.2.1.1 Vitesse 42

IV.2.1.2Température ……..…44
IV.2.1.3 Récapitulation des résultats……..…..46
IV.2.2 Discussion des résultats du deuxième cas……....……47
IV.2.2.1Vitesse ……..……..…..…47
IV.2.2.2 Température ……..….50
IV.2.2.3 Récapitulation des résultats……..…..51
IV.2.3 Discussion des résultats du troisième cas ……..……..…...….52
IV.2.3.1 Vitesse ……..…52
IV.2.3.2 Température ……..…...…55
IV.2.3.3 Récapitulation des résultats ……..……...…56
IV.2.4 Discussion des résultats du quatrième cas ……..…57
IV.2.4.1Récapitulation des résultats ……...……...…60
IV.2.5 Discussion des résultats du cinquième cas ……..……61
IV.2.5.1 Récapitulation des résultats ……...……...…63
IV.3 Conclusion…..……...……..63
CONCLUSION ET RECOMMANDATION……...….64
BIBLIOGRAPHIE.. ……...….65

LISTE DE FIGURE

Figure I.1 : L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement..... ..3
Figure I.2 : Préférence de mouvement d'air par rapport à la sensation thermique..... ..6
Figure I.3 : Un schéma de transmission de signal dans le système thermorégulateur 9
Figure I.4 :Une plage de confort hygrothermique dans le diagramme.....10
Figure I.5 : PPD en fonction du PMV..... 13
Figure II.1 : Humidificateurs à Vapeur..... 17
Figure II.2 : Humidificateurs à Évaporation.....18
Figure II.3 : Humidificateurs Ultrasoniques.....18
Figure II.4: Ventilation naturelle 20
Figure II.5: Ventilation Mécanique Simple Flux..... .20
Figure II.6: Ventilation Mécanique Double Flux 21
Figure III.1 : importer la géométrie de votre système dans ANSYS… 30
Figure III.2 : Créez un maillage qui discrétise la géométrie en éléments plus petits..... .31
Figure III.3 : Définissez les conditions aux limites de votre problème.....31
Figure III.4 : Choisissez le solveur approprié pour votre problème 32
Figure III.5 : Spécifiez les propriétés du fluide 32
Figure III.6: Configurez les paramètres du solveur tels que les critères de convergence.... 33
Figure III.7: Géométrie de la chambre..... .35
Figure III.8 : Maillage (taille d'élément = 0.1)..... …36
Figure III.9 : Maillage (taille d'élément = 0.01)..... ..37
Figure IV.1: Variation de champs des vitesses. ..... ……42
Figure IV.2 : Graphe de variation de champs des vitesses..... ….42
Figure IV.3 : Représentation de V1 à V5 dans le champ de vitesse..... ……..44
Figure IV.4 : La variation de champ de la température..... ……..….44
Figure IV.5 : Graphe de La variation du champ de la température.....……45
Figure IV.6 : La variation du champ de la vitesse. ..... ……47
Figure IV.7 : Graphe de La variation du champ de la vitesse ..... …..48
FigureIV.8 : La variation du champ de la température ..... ……50
Figure IV.9 : Graphe de La variation du champ de la température..... ……..50
FigureIV.10 : La variation du champ de la vitesse.. ..... ……..52
FigureIV.11 : graphe de La variation du champ de la vitesse..... ……..53
FigureIV.12 : La variation du champ de la température..... ……..55
FigureIV.13 : graphe de La variation du champ de la température…….55
Figure IV.14 : Zone de dispersion de polluant. …….……57
FigureIV.15 : Image séquentielle de la variation de champs de température ……58
FigureIV.16 : la variation de la température devant la bouche de l'humain en fonction du temps……..…59
FigureIV.17 : la variation de la température proche de point de dispersion du polluant en fonction du temps……..……....59
Figure IV.18 : la variation de la température proche de point de soufflage de l'air conditionné en fonction du temps……..60
Figure IV.19 : Image séquentielle de la variation de champs de température……...…61

Figure IV.20 : la variation de la température devant la bouche de l'humain en fonction du temps……..……..62
Figure IV.21 : la variation de la température proche de point de dispersion du polluant en fonction du temps…….……..…62
Figure IV.22 : la variation de la température proche de point de soufflage de l'air conditionné en fonction du temps……..…63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Tableau de paramètre du local.....40
Tableau II-2 : Tableau de caractéristique des spécimens…. .....….41

MONOCLATURE

Symbole :

C : flux convectif global ;

h_c coefficient d'échange par convection ;

$\bar{T}_{sk}$ température moyenne de peau ;

T_a Température de l'air ;

A_c surface cutanée exposée (souvent la surface totale A_d

F_{cl} facteur de prise en compte de l'effet lié à l'isolement vestimentaire ;

h_e coefficient d'évaporation qui aelon I 'analogie Nusselt/Sherwood est directement ;

$P_{a\,H_2O}$: pression partielle de vapeur d'eau ambiante (kPa) ;

$P_{sk\,H2O}$ pression saturante de vapeur d'eau à la température cutanée P_{sk} (kPa) ;

A_e surface d'évaporation ;

M : de l'activité métabolique ;

W : (souvent nul) du travail fourni à l'extérieur ;

K : des échanges conductifs ;

C et respiratoires : des échanges convectifs cutanés;

R des échanges radiatifs;

E et respiratoires Eres : des échanges évaporatoires cutanés ;

u est la vitesse du fluide ; ρ est la densité du fluide ;

S_i est une force externe distribuée par masse par unité de masse due à une résistance du milieu poreux($Siporous$), une poussée d'Archimède ($Sigravity$ = -ρg) ;

g est la composante de l'accélération gravitationnelle le long de la direction de coordonnée i-th, et la rotation du système de coordonnées ($Sirotation$) ;

S = ($Siporous$ + $gravity$ + $Sirotation$) ;

h est l'enthalpie thermique ;

QH est une source ou un puits de chaleur par unité de volume ;

τij est le tenseur de contrainte de cisaillement visqueux ;

q est le flux de chaleur diffusif ;

Ω est la vitesse angulaire du système de coordonnées en rotation ;

r est la distance entre un point et l'axe de rotation dans le cadre de référence de rotation ;

k est l'énergie cinétique de la turbulence ;

hm est l'enthalpie de la composante m-ième du mélange ;

ym est une concentration de la composante m-ième du mélange ;

δij la fonction delta de Kronecker (elle est égale à l'unité lorsque $i = j$, sinon zéro) ;

μ est le paramètre de viscosité dynamique ;

μt est le coefficient de viscosité turbulente ;

k est l'énergie cinétique turbulente ;

ρ représente la densité du fluide porteur et du mélange de substance (comme $y << 1$, ρ peut être considéré similaire pour les deux) ;

t est le temps, xi est le i-ème composant du système de coordonnées utilisé ;

ui est le i-ème composant de la vitesse du fluide porteur ;

p est la pression statique du fluide porteur ;

R est la constante universelle des gaz ;

m est la masse molaire (pour à la fois le fluide porteur et le mélange de substances) ;

m_s est la masse molaire de la substance ;

m_p est la masse molaire du fluide porteur ;

v_1 est le volume spécifique de la substance .

Abréviation :

CVC : chauffage, ventilation et climatisation ;

PPD : (Predicted Percent Dissatisfied) : pourcentage d'insatisfaction prévu ;

PMV : (Predicted Mean Vote) : vote moyen prédit ;

ASHRAE : société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation ;

QAI : qualité de l'air intérieur ;

CFD : dynamique des fluides computationnels ;

VAV : systèmes de climatisation à ventilation variable ;

DDC : systèmes de climatisation à détente directe ;

MEF : La méthode des éléments finis ;

EDP : équations aux dérivées partielles.

Introduction générale

Depuis l'antiquité, l'humanité a persisté à se prémunir contre les aléas climatiques tels que les intempéries et les fortes chaleurs en fabriquant des vêtements adaptés et en cherchant refuge dans des abris. Perpétuellement en quête d'un environnement de vie amélioré et d'un confort accru, l'homme a traversé les âges en modernisant progressivement son habitat, passant graduellement des simples grottes naturelles et des cabanes rudimentaires de la préhistoire aux maisons élaborées en bois, en pierre et autres matériaux contemporains.

Le confort thermique est un concept complexe qui englobe non seulement la sensation subjective de chaleur ou de fraîcheur ressentie par un individu, mais aussi une série de paramètres objectifs liés à l'environnement thermique dans lequel il évolue. Il est largement reconnu que le maintien d'un niveau optimal de confort thermique est crucial pour la santé, le bien-être et la productivité des occupants des bâtiments, qu'il s'agisse de résidences, de bureaux, d'écoles ou d'autres types d'espaces intérieurs. Dans le cadre du développement durable, le confort thermique revêt une importance particulière car il est étroitement lié à l'efficacité énergétique, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la préservation des ressources naturelles. Les stratégies visant à améliorer le confort thermique doivent donc être conçues dans une perspective holistique, prenant en compte à la fois les aspects sociaux, économiques et environnementaux [1]. Le développement durable en matière de confort thermique exige une approche intégrée et proactive, combinant des stratégies de conception innovantes, des technologies efficaces et une gestion avisée pour créer des environnements intérieurs qui sont à la fois confortables pour les occupants et respectueux de l'environnement. Le confort thermique représente la satisfaction ressentie vis-à-vis de l'environnement thermique, résultant de divers facteurs liés aux échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement. Il se traduit par une sensation de bien-être thermique, influencée par une multitude de paramètres. Défini de manière subjective, il englobe tous les éléments affectant l'état thermique du résident, ce qui rend difficile une description exhaustive du concept [2].

Dans notre étude, nous explorons les paramètres intrinsèques influençant le confort thermique afin d'atteindre des résultats optimaux pour les occupants d'un espace résidentiel clos. Notre projet de Master est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur le confort thermique. Le deuxième chapitre est consacré au conditionnement de l'air. Le troisième chapitre traite du modèle mathématique et de la simulation numérique. Les résultats et les discussions sont présentés dans le quatrième chapitre. Enfin, ce manuscrit se conclut par une conclusion et des recommandations.

Chapitre I :
Généralités sur
le confort thermique

I.1 Introduction

Le confort thermique est défini comme la satisfaction des occupants d'un espace vis- à-vis de leur environnement thermique. Cet aspect est important dans la conception des bâtiments et la gestion des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). Une compréhension approfondie des principes de confort thermique est essentielle pour créer des environnements intérieurs qui favorisent le bien-être et la productivité des occupants [3].

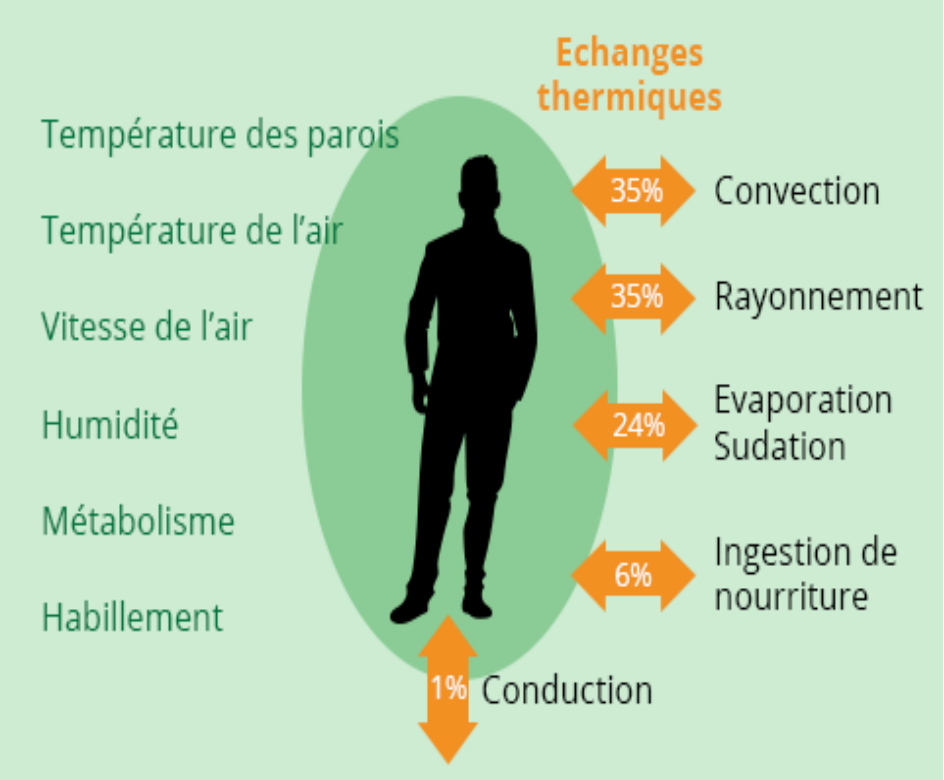


Figure I.1 : L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement. [4]

I.2 Facteurs affectant le confort thermique :

I.2.1 Température de l'air : La température de l'air est l'un des facteurs les plus évidents affectant le confort thermique. Les occupants ont tendance à se sentir à l'aise dans une plage de températures relativement étroite, généralement entre 20 et 24 degrés Celsius. Des températures trop élevées ou trop basses peuvent provoquer un inconfort thermique. [5]

I.2.2 Humidité : L'humidité relative de l'air joue également un rôle essentiel dans le confort thermique. Un air trop humide peut vous donner une sensation de lourdeur et favoriser la croissance de moisissures, tandis qu'un air trop sec peut provoquer des irritations respiratoires et des problèmes de peau. [6]

I.2.3 Mouvements d'air : Les mouvements d'air peuvent faciliter une régulation de la température perçue par les occupants. Une circulation d'air efficace peut réduire les fluctuations de température et éliminer les zones stagnantes et présentant une température trop chaude ou trop froide.

I.2.4 Rayonnement thermique : Ce terme est utilisé pour décrire le transfert de chaleur entre les surfaces d'une pièce et ses occupants. Les surfaces chaudes rayonnent généralement de la chaleur vers les occupants, tandis que les surfaces froides provoquent généralement une sensation de fraîcheur inconfortable.

I.3 Approches pour améliorer le confort thermique :

I.3.1 Conception bioclimatique : La conception bioclimatique tire parti du climat local pour maximiser le confort thermique des bâtiments. Il peut s'agir de réaliser des bâtiments orientés au nord en hiver et de minimiser l'exposition en été, ou d'utiliser des matériaux à forte inertie thermique pour réguler la température. [7]

I.3.2 Isolation et étanchéité : Une isolation et une étanchéité à l'air adéquates sont essentielles pour réduire la quantité de chaleur perdue en hiver et le gain de chaleur en été. Cela facilite le maintien d'une température constante et stable à l'intérieur de la maison tout au long de l'année. [8]

I.3.3 Systèmes CVC efficaces : Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation doivent être conçus et entretenus pour fournir des conditions thermiques optimales tout en minimisant la consommation d'énergie. Cela peut inclure l'utilisation de thermostats programmables, de systèmes de récupération de chaleur et de contrôles de zone pour ajuster les conditions thermiques aux besoins des occupants. [9]

I.4 Les transferts de chaleur qui influent sur le confort thermique :

Une situation de confort thermique est atteinte lorsque notre environnement thermique nous procure une sensation de bien-être. L'environnement thermique correspond aux caractéristiques de l'environnement qui affectent nos échanges de chaleur avec ce qui nous entoure. Ces échanges thermiques se font :

- Par évaporation (transpiration) L'évaporation de l'eau de la surface de la peau est un moyen de perdre de la chaleur, abaissant ainsi la température corporelle.
- Par rayonnement, deux objets échangent de l'énergie même sans contact. Par exemple, le soleil chauffe nos maisons toute la journée. Lorsque la température extérieure diminue, l'objet qui a absorbé cette chaleur rayonne à nouveau la chaleur.
- Par conduction On perd ou gagne de l'énergie par contact direct avec un objet froid ou chaud, mais l'effet de cette méthode de transfert est plus faible que la méthode précédente.
- Par convection L'échange thermique entre l'air ambiant et le corps humain est augmenté par la vitesse de l'air et la différence de température entre les deux corps humains. [10]

I.5 La répercussion de la circulation d'air au confort des occupants :

La transition des conditions de mouvement d'air de statique à une légère brise Traditionnellement, les zones de confort définies dans les normes étaient basées sur l'idée que des conditions d'air statique sont idéales. Elles étaient appuyées par des dispositions sur le risque de courant d'air qui empêchaient le mouvement d'air dans une large plage de températures intérieures. La question était de savoir si ce risque se produisait réellement dans les bâtiments. Des études de terrain détaillées ont fourni des preuves montrant que significativement plus de personnes préfèrent avoir plus de mouvement d'air par rapport à moins, dans toutes les saisons et dans toutes les conditions entre "légèrement frais" et "chaud".

Des études en laboratoire et sur le terrain montrent que le mouvement d'air compense les températures plus élevées pour rendre les gens confortables, mais aussi que les gens préfèrent un niveau perceptible de mouvement d'air même lorsque leurs sensations sont légèrement fraîches. Les études ont également montré que le mouvement d'air peut avoir un effet positif sur la qualité de l'air intérieur, en particulier lorsque les personnes peuvent contrôler le mouvement de l'air.

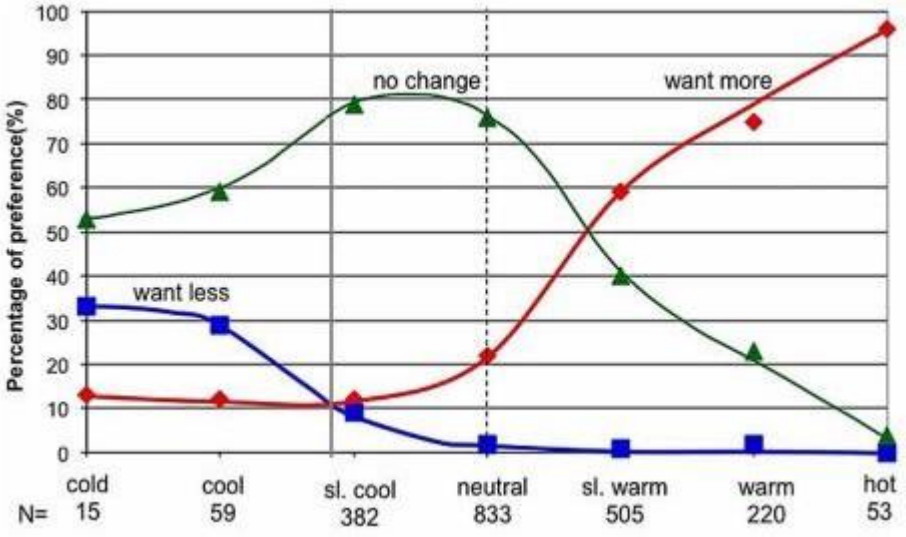


Figure I.2 : Préférence de mouvement d'air par rapport à la sensation thermique. [11]

I.6Effets thermiques :

I.6.1 Effet dû à la conduction : Même si nous échangeons parfois de la chaleur par conduction(K), seules de petites zones corporelles sont concernées. Quand des parties plus grandes de notre surface sont en contact avec des éléments de mobilier (chaise, fauteuil, canapé, lit), les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance : globalement donc, en régime permanent, on néglige les températures de surface et les aspects conductifs, en les incluant dans les échanges convectifs

I.6.2 Effet dû à la convection : La température de l'air est un paramètre très important parce qu'elle participe activement et de façon permanente (dans nos climats, du moins) à notre déperdition calorique du fait de sa part active dans les échanges convectifs. Son impact est d'autant plus grand que les vitesses de l'air et des courants sont également influentes dans cette modalité d'échange.

Les échanges par convection sont régis par l'équation :

$$C = h(T_a - \bar{T}_{sk})A_c F_{cl} \text{ ..... (I-1)}$$

Si l'isolement est nul, $F_{cl} = 1$, impliquant 100% des échanges possibles ; si l'isolement est grand, F_{cl} tend vers o , limitant considérablement le flux convectif.

I.6.3Effet dû à la radiation : La température de rayonnement correspond à la température des surfaces avec lesquelles le corps humain échange de la chaleur. Le flux radiatif dépend de la constante de Stefan-Boltzmann, de l'émissivité des corps, des différences des puissances quatrièmes de températures des surfaces et des facteurs de forme. Dans un souci de simplification et par analogie avec l'échange convectif, on utilise une formule simplifiée linéarisée :

$$R = h(T_r - T_{sk})A_r F_{cl} \text{ ..... (I-2)}$$

I.6.4 Effet dû à l'humidité : A priori, l'humidité en elle-même n'a pas beaucoup d'impact sur les échanges thermiques. Elle intervient parce que l'organisme humain a des muqueuses qui, par définition, sont toujours moites ou mouillées (lèvres, yeux, voies respiratoires). À ce niveau les échanges sont relativement faibles mais la perception des changements est grande. Au niveau cutané, par contre, la sudation, quand elle se produit, permet une déperdition calorique évaporatoire importante régie par la loi :

$$E = h(P_{a_{H20}} - P_{sk_{H20}})A_e F_{pcl} \text{ ..... (I-3)}$$

proportionnel au coefficient de convection suivant la relation de Lewvis (analogie entre le transfert de masse et le transfert de chaleur):

$k = 2{,}2\text{K} \cdot \text{Torr}^{-1}$ ou encore $16{,}7\text{K} \cdot \text{kPa}^{-1}$;

$$h_e = k\, h_c \text{ ..... (I-4)}$$

Ce concept de mouillure est intéressant car il est représentatif de I ‘astreinte chaude. A 6% de mouillure, on peut montrer que l'évaporation cutanée correspond à la perspiration insensible, perte minimale associée au confort du quotidien. A 100% de mouillure, on comprend bien que la contrainte est maximale. Des expériences de laboratoire tendent à montrer que, dès que la mouillure atteint des valeurs de 30%, l'inconfort grandit pour être atteint définitivement à 50% quand une partie de la sueur commence à ruisseler. Bien sûr, le ruissellement se produit d'abord sur la région ou l'évaporation est la moins favorisée : il s'agit souvent du tronc qui possède le moins bon coefficient d'évaporation et bénéficie bien souvent du plus grand isolement thermique local.

I.6.5 Effets métaboliques : Les processus métaboliques internes du corps humain engendrent, entre autres, de la chaleur. Chez une personne en bonne santé, cela maintient une température centrale "normale" stable, généralement autour de 37 ± 0,3 °C. Cette chaleur produite est véhiculée à travers le sang et partiellement transférée à travers les tissus pour atteindre la peau, où elle peut se dissiper. La quantité de chaleur dépend de l'environnement thermique environnant. Lorsque la chaleur produite par le corps est excessive par rapport à la capacité de refroidissement de l'environnement, cela peut entraîner une surchauffe et une augmentation de la température centrale. À l'inverse, si la quantité de chaleur produite est insuffisante, cela peut entraîner une baisse de la température centrale. Comme un changement de température corporelle au-delà de la plage normale induit un stress thermique, le corps humain est pourvu d'un système de thermorégulation qui ajuste le fonctionnement des organes pour qu'ils s'adaptent à l'environnement thermique ambiant.

Le système thermorégulateur essentiel pour maintenir la température corporelle. Il fonctionne comme un thermostat, contrôlant la vasodilatation, la vasoconstriction, la transpiration et les frissons. Situé dans l'hypothalamus, il se compose de thermorécepteurs, d'un centre de régulation et d'effecteurs (principalement les muscles), agissant ensemble pour maintenir une température corporelle stable malgré les changements environnementaux.

Le fonctionnement du système thermorégulateur est présenté dans la **Figure I .3** .

La température de la peau sur différentes parties du corps indique comment le système thermorégulateur fonctionne, tandis que les changements reflètent la quantité de chaleur échangée avec l'environnement et la valeur de la température centrale. Lorsqu'un corps humain est exposé à des conditions thermiques plus chaudes que neutres, une vasodilatation se produit et le flux sanguin sous-cutané augmente (Bullard 1970, Johnson 1974, Libert 1978, Nadel, 1973). En conséquence, le flux de sang chaud est dévié des organes internes vers la peau, ce qui facilite la libération de chaleur dans l'atmosphère et, en même temps, augmente le coefficient de transfert de chaleur à travers la peau.

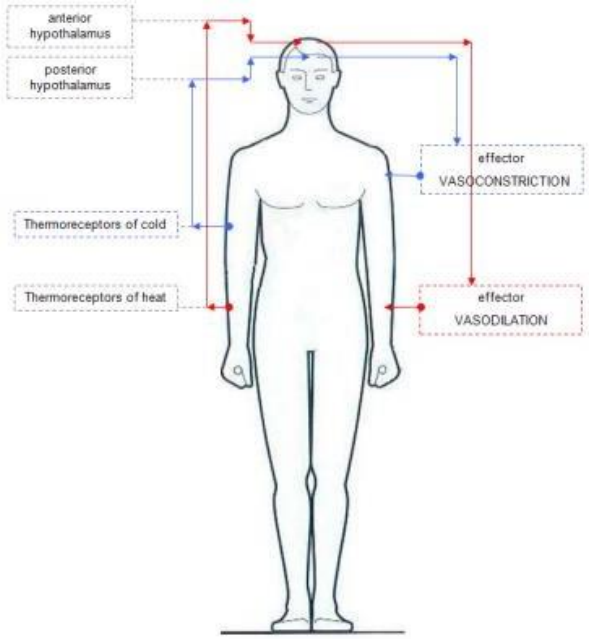


Figure I.3 : Un schéma de transmission de signal dans le système thermorégulateur. [12]

La sélection des paramètres thermiques et d'humidité dans les espaces occupés devrait être basée sur les mécanismes régulant les sensations thermiques. Cependant, la sensation de chaleur est une réaction complexe du corps humain. Elle reflète, dans une large mesure, le fonctionnement du système thermorégulateur. [13]

I.7 Bilans thermiques :

Les échanges thermiques de l'Homme dans son environnement dépendent donc des facteurs environnementaux et des facteurs humains. L'ensemble de ces influences s'appelle le bilan thermique dont il est possible de faire une estimation a priori. C'est grâce au calcul du bilan thermique qu'il sera possible de prédire si les conditions sont propices ou non à l'établissement du confort.

I.7.1 Bilan global : L'ensemble des productions et échanges de chaleur décrit précédemment permet en effet de quantifier le bilan thermique(B) de l'être humain dans son environnement. Il s'écrit, avec les conventions de signe – pour ce qui est perdu pour l'homme

exemple : (métabolisme)

B= M-W+K+C+C res +R-E-Eres ..... (I-5)

Un bilan B nul correspond à l'équilibre thermique de l'organisme humain impliquant une stabilité des températures corporelles. Néanmoins, l'équilibre thermique peut être réalisé sous une infinité de conditions métaboliques et thermo hygrométriques qui ne sont pas toutes synonymes de confort. [14]

I.8 La plage de confort thermique :

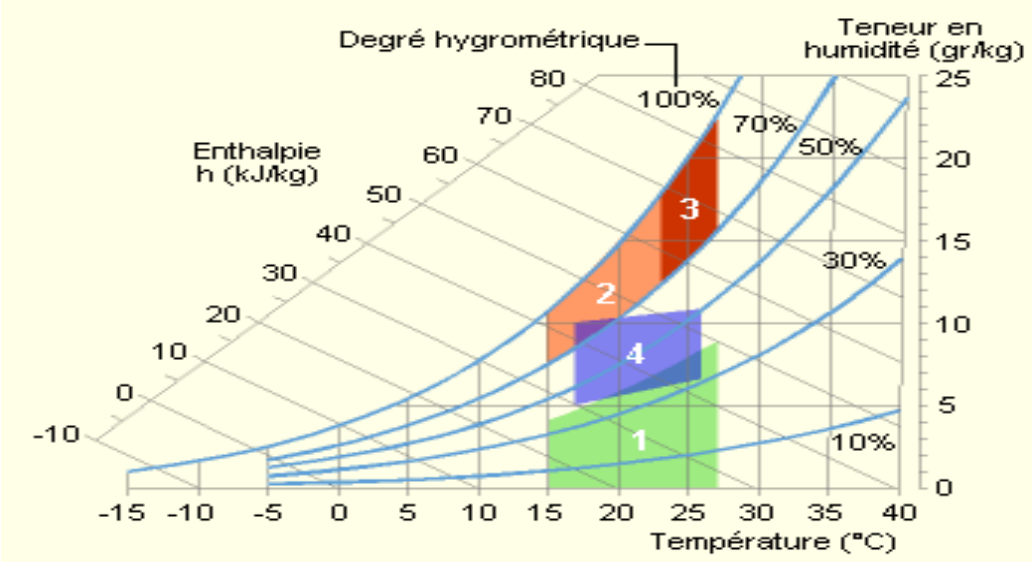


Figure I.4 : une plage de confort hygrothermique dans le diagramme. [15]

1.Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse ;

2.Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons ;

3.Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens ;

4.Polygone de confort hygrothermique.

I.8.1 Température : La plage de confort thermique désigne la plage de température dans laquelle la majorité des occupants se sentent à l'aise et satisfaits de leur environnement thermique. Cette plage peut varier légèrement en fonction des préférences individuelles, du niveau d'activité, des vêtements portés et d'autres facteurs, mais elle est généralement définie comme suit :

I.8.1.1 Température de confort : La plage de température de confort typique se situe généralement entre 20°C et 24°C (68°F - 75°F). Dans cette plage, la plupart des individus se sentent à l'aise, ni trop chauds ni trop froids, et peuvent vaquer à leurs activités sans ressentir de gêne due à la température ambiante.

I.8.1.2 Limite inférieure de confort : En dessous de 20°C (68°F), les occupants peuvent commencer à ressentir du froid et à chercher des moyens de se réchauffer, comme porter des vêtements plus chauds ou augmenter la température de chauffage. En dessous de cette température, le risque d'inconfort thermique augmente, en particulier pour les occupants plus sensibles au froid.

I.8.1.3 Limite supérieure de confort : Au-dessus de 24°C (75°F), les occupants peuvent commencer à ressentir de la chaleur et chercher des moyens de se rafraîchir, comme utiliser un ventilateur ou activer la climatisation. À des températures plus élevées, le risque d'inconfort thermique augmente, en particulier lorsqu'il y a une humidité élevée ou un manque de ventilation.

I.8.2 Humidité :

La plage de confort d'humidité relative désigne la gamme d'humidité à laquelle la plupart des individus se sentent à l'aise et ne ressentent pas d'inconfort lié à l'humidité de l'air. Cette plage peut varier en fonction de facteurs tels que la température ambiante et les préférences individuelles, mais elle est généralement définie comme suit :

I.8.2.1 Plage de confort d'humidité relative : La plage de confort d'humidité relative se situe généralement entre 30% et 60%. Dans cette plage, la plupart des individus se sentent à l'aise et ne ressentent pas d'inconfort lié à l'humidité de l'air. Un air trop sec (en dessous de 30% d'humidité relative) peut provoquer des irritations des voies respiratoires, des problèmes de peau et une sensation de sécheresse. À l'inverse, un air trop humide(Au-dessus de 60% d'humidité relative) peut donner une sensation de lourdeur, favoriser la croissance de moisissures et d'acariens, et aggraver les problèmes respiratoires et les allergies .

I.8.2.2 Limite inférieure de confort : En dessous de 30% d'humidité relative, l'air est considéré comme trop sec, ce qui peut entraîner des problèmes de santé et de confort pour les occupants. À des niveaux d'humidité inférieurs, les occupants peuvent ressentir une sensation de sécheresse des voies respiratoires, des yeux et de la peau, ainsi qu'une augmentation de l'électricité statique.

I.8.2.3 Limite supérieure de confort : Au-dessus de 60% d'humidité relative, l'air est considéré comme trop humide, ce qui peut également entraîner des problèmes de santé et de confort pour les occupants. À des niveaux d'humidité plus élevés, les occupants peuvent ressentir une sensation de lourdeur, une augmentation de la transpiration et une augmentation du risque de croissance de moisissures et d'acariens.

Il est important de noter que la plage de confort d'humidité relative peut varier en fonction de facteurs tels que la température ambiante et les activités des occupants. La conception et la gestion des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation doivent prendre en compte ces facteurs pour maintenir des conditions d'humidité optimales et promouvoir le bien-être des occupants dans les environnements intérieurs.

I.9 Etat de l'art :

Si l'on parle de confort thermique, il existe plusieurs modèles et théories pour évaluer et améliorer le confort thermique des bâtiments. L'un des modèles les plus connus est le modèle PMV (Predicted Mean Vote) et le modèle PPD (Predicted Percent Dissatisfied) développés par Fanger. Ces modèles prennent en compte des variables telles que la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative, les vêtements portés, etc., pour estimer le confort thermique ressenti par les occupants. Sur la base des résultats de ces modèles, des ajustements aux conditions environnementales (par exemple, ajustement des températures de chauffage ou de climatisation) peuvent être effectués pour améliorer le confort thermique.

Modèle de Fanger :L'utilisation du modèle de Fanger (1972) permet d'évaluer le confort thermique de façon plusholistique. Ce modèle consiste à prévoir le vote moyen (PMV) des occupants avec le pourcentage prévisible d'occupants insatisfaits (PPD).

Ce modèle donne de meilleurs résultats en condition d'équilibre thermique. Les six facteurs sur leconfort thermique mentionnés précédemment sont à considérer pour le calcul du PMV.

Le PPD est calculé en fonction du PMV. Selon l'ASHRAE 55-2013, le taux métabolique doit se situer entre 1 et 2 met et l'isolation des vêtements est de 1,5 clo ou moins. De plus, les occupants votent à l'aide d'une échelle de sensation thermique de sept points définis ainsi: -3 cold, -2 cool, -1 slightly cool, 0 neutral, +1 slightly warm, +2 warm et +3 hot. La plage acceptable est d'un écart du PMV de ± 0,5 avec un PPD de 10 %, qui représente un inconfort thermique pour tout le corps. Cependant, avec l'ajout d'un pourcentage de 10 % d'inconfort local, qui peut être ressenti sur une partie du corps, ceci donne un PPD de 20 % pour un écart du PMV de ± 0,5. La zone de confort présentée à la **Figure I.5** correspond à un PMV de ± 0,5. [16]

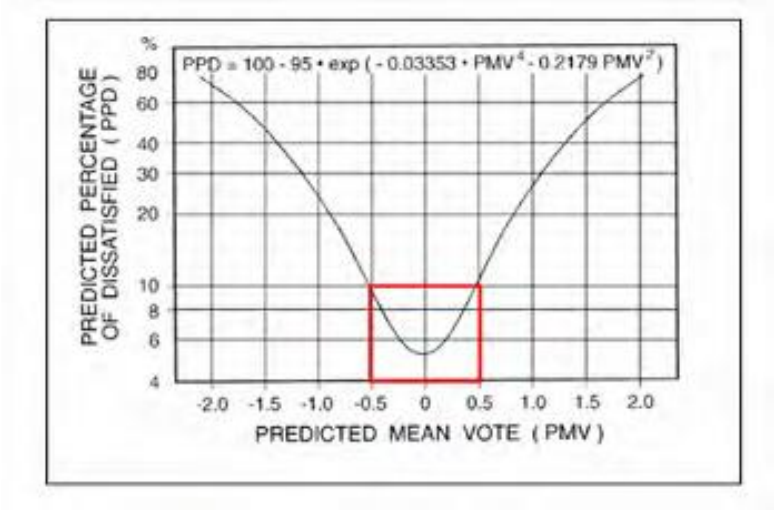


Figure I.5 : PPD en fonction du PMV. [17]

Ce modèle de Fanger (1972) a été ajusté de façon à fournir de meilleurs résultats de PMV dans des bâtiments naturellement ventilés en climat chaud, c'est-à-dire dans un contexte de confort thermique adaptatif. Le PMV est souvent surestimé puisque les attentes des occupants sont moins élevées face aux conditions environnementales intérieures. Les occupants s'adaptent en effectuant des activités moins exigeantes physiquement, ce qui a pour effet que leur taux métabolique estimé est plus élevé qu'il ne l'est en réalité dans un climat chaud. Donc, un facteur d'espérance (e) est utilisé pour adapter le calcul du PMV. Ce facteur e varie entre 1 et0,5 où 1 correspond à un bâtiment avec de l'air conditionné (OleFanger et Toftum, 2002).

Cette approche a aussi été utilisée par Yang et al. (2011), où un modèle de type « boîte noire »a servi au calcul des votes moyens prévus dans le cas d'un confort thermique adaptatif (aPMV). Fanger, P.O. 1972. « Thermal comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering ». [18]

Le modèle de Gagge, aussi appelé modèle de Gagge-Nishi-Stolwijk, est une méthode couramment utilisée pour évaluer le confort thermique. Il prend en compte divers paramètres tels que la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent, l'activité physique et les vêtements pour estimer une température équivalente, représentant la sensation thermique globale d'une personne dans un environnement donné. Cette approche, développée en 1971 par A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk et Y. Nishi, repose sur la régulation thermique du corps humain. Le modèle utilise des équations et des poids pour évaluer l'impact de chaque paramètre sur le confort thermique. Bien que des modèles plus complexes aient été développés depuis, le modèle de Gagge reste largement utilisé en raison de sa simplicité et de son intégration dans les normes telles que celles de l'ASHRAE et de l'ISO.

Le confort thermique d'un bureau situé dans le centre-ville de Cracovie (sud de la Pologne) a été étudié par Borowski et al. (2021) pour démontrer les paramètres de distribution de l'air de la buse d'air de fourniture. Des tests ont été réalisés sur deux longueurs différentes avec différents types de diffuseurs, avec buses et buses réglables, qui faisaient partie du système de climatisation du bureau. Il a été constaté que le microclimat d'une pièce particulière et les conditions de confort dépendent également de la vitesse de l'air de la pièce, non seulement des valeurs de température et d'humidité, surtout dans la zone occupée. De plus, le choix incorrect du type ou de l'emplacement des composants du système de climatisation peut contribuer à un inconfort local pour les occupants du bâtiment.

Prabhakaran (2018) ont ajouté le modèle de source de chaleur à la ventilation pour évaluer les facteurs de confort humain et la température de l'air intérieur. La charge thermique nette de la personne, la source de chaleur du liquide de refroidissement et le rayonnement solaire sont pris en compte. Les résultats des indicateurs PMV et PPD présentent des valeurs très raisonnables par rapport à la recherche existante sur les niveaux de confort humain par rapport à l'ASHRAE.

Une autre étude (Ahmed, 2012) a étudié la performance du système de ventilation dans une chambre d'hôpital. L'obtention d'une qualité de l'air intérieur (QAI) dépend de nombreux facteurs, notamment de l'élimination des polluants. Par conséquent, une EEC supérieure à un est fortement requise pour le système de ventilation optimal

. La simulation donne une EEC de 1,23 pour l'air exhalé, ce qui signifie que le système de ventilation est raisonnablement efficace pour éliminer l'air pollué, bien que le résultat de l'étude soit Satisfaisant. Cependant, les résultats obtenus par cette étude ne sont pas aveuglément applicables aux pays chauds et humides.

Une autre recherche (Ameer et al., 2021) examine comment la distance sociale fonctionne dans les environnements intérieurs ventilés. Le rôle du flux d'air dans la dispersion des maladies virales aériennes a été étudié à l'aide du logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD). Augmenter le débit à la sortie conduit à une valeur d'EEC plus élevée. Une vitesse d'écoulement plus importante au niveau des sorties sera plus efficace pour expulser le polluant, qui est toujours présent à l'intérieur de l'endroit. [19]

I.7 Conclusion

Ce chapitre offre une approche systématique pour évaluer la sensation du confort thermique en tenant compte de facteurs tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air, l'activité métabolique et tout facteur affectent le confort thermique.

.

CHAPITRE II :

Humidification, ventilation et climatisation

II. 1Introduction :

L'air que nous respirons joue un rôle essentiel dans notre confort quotidien, surtout lorsqu'il s'agit de maintenir une température agréable et un niveau adéquat d'humidité. Dans ce contexte, la climatisation, la ventilation et l'humidification sont des composantes clés pour créer et maintenir un environnement intérieur propice au bien-être, à la santé et à la productivité des individus. [20]

II.2 Humidification :

II.2.1 Définition : La conception d'un système d'humidification pour un environnement. Maintenir un niveau d'humidité adéquat est crucial pour le confort des occupants, la santé, ainsi que la préservation des équipements et du mobilier. Nous examinerons différents types de systèmes d'humidification, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les considérations de conception pour assurer une humidification efficace et économe en énergie.

II.2.2 Types de systèmes d'humidification : Il existe plusieurs types de systèmes d'humidification, Voici un aperçu des principaux types de systèmes d'humidification utilisés aujourd'hui :

II.2.2.1 Humidificateurs à vapeur : Ces humidificateurs utilisent de l'eau chauffée pour produire de la vapeur, qui est ensuite dispersée dans l'air ambiant. Ils peuvent être installés de manière centralisée ou décentralisée, en fonction des besoins spécifiques du bâtiment.

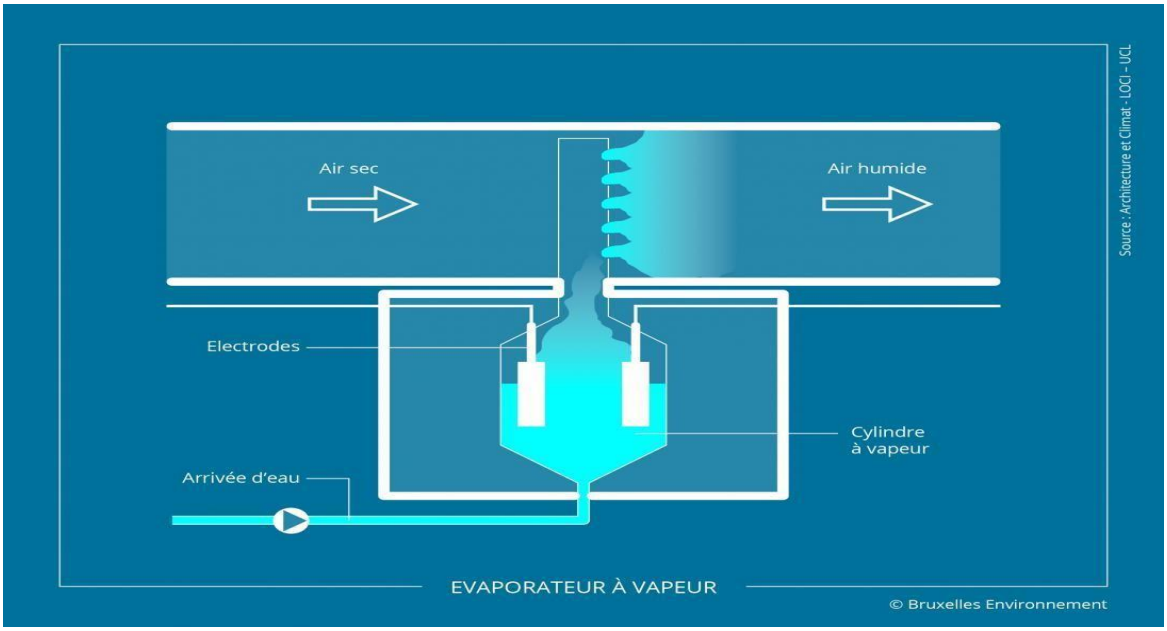


Figure II.1 : Humidificateurs à vapeur. [21]

II.2.2.2 Humidificateurs à évaporation : Ces humidificateurs utilisent un ventilateur pour faire passer l'air sec à travers un médium humidifiant, tel que des panneaux, des tampons ou des disques, pour augmenter l'humidité relative de l'air.

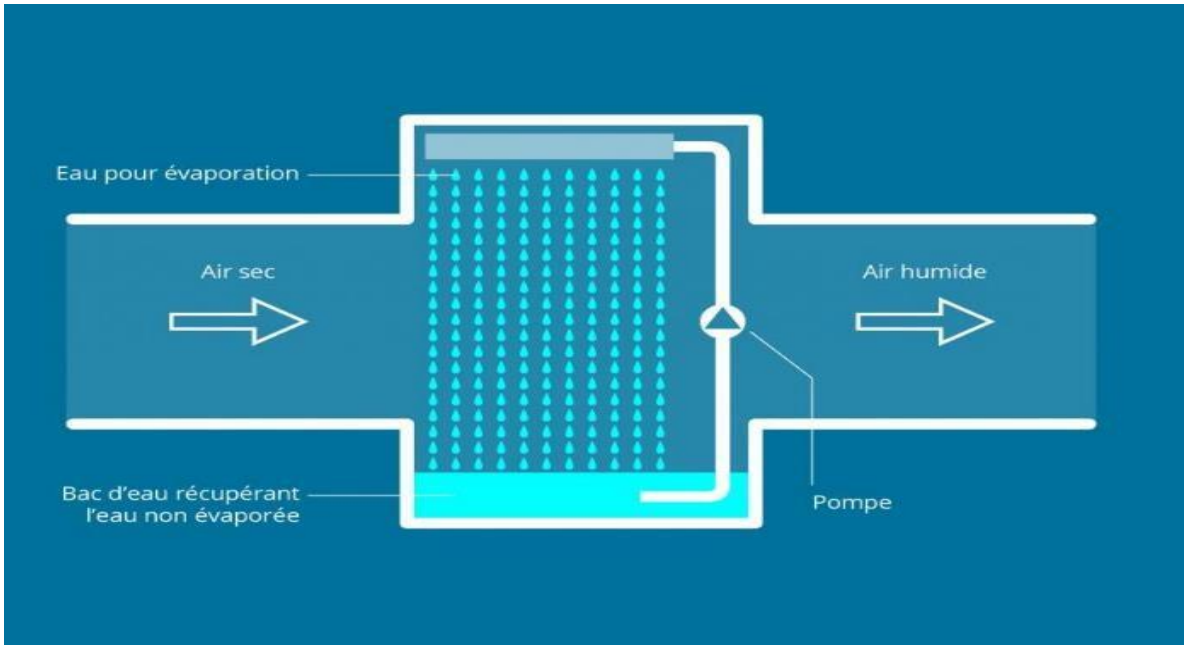


Figure II.2: Humidificateurs à évaporation**.** [21]

II.2.2.3 Humidificateurs ultrasoniques : Ces humidificateurs utilisent des vibrations ultrasoniques pour transformer l'eau en fine brume, qui est ensuite dispersée dans l'air pour augmenter l'humidité relative.

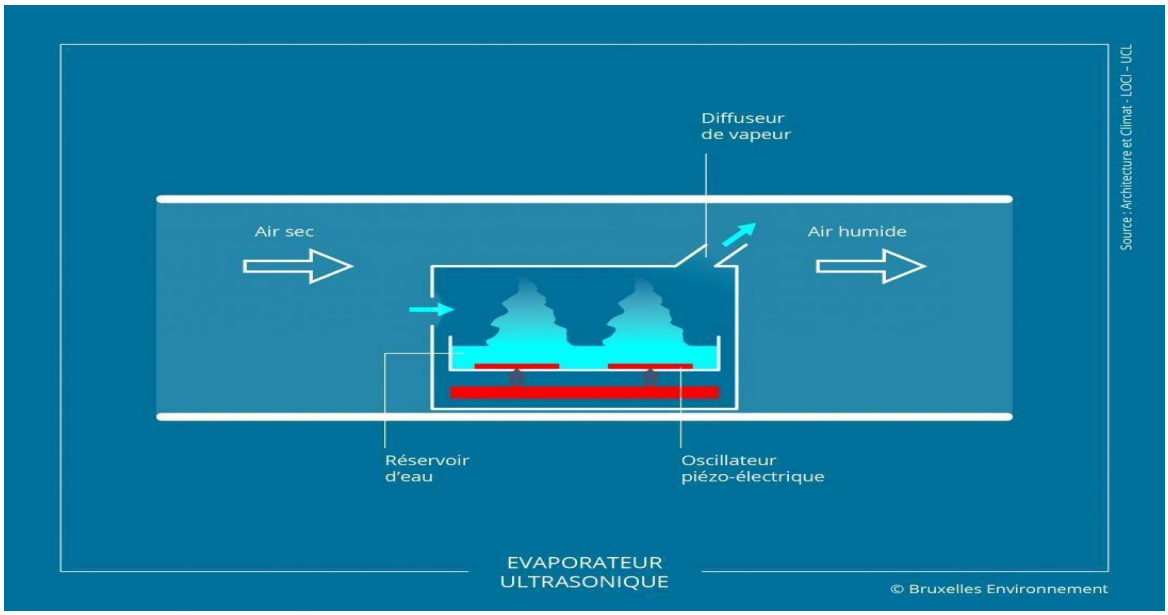


Figure II.3 : Humidificateurs ultrasoniques. [21]

II.2.3 Sélection et dimensionnement du système d'humidification : Dans cette section, nous discuterons des facteurs à prendre en compte lors de la sélection et du dimensionnement d'un système d'humidification pour un environnement de bureau, notamment.

II.2.3.1 Calcul des besoins en humidification : Il est essentiel d'évaluer les besoins en humidification en fonction de la taille du local, du nombre d'occupants, des activités menées, ainsi que des exigences de confort.

II.2.3.2 Analyse des coûts et de l'efficacité énergétique : Il convient d'examiner les coûts d'installation et de fonctionnement du système d'humidification, ainsi que son efficacité énergétique pour garantir une solution rentable à long terme.

II.2.4 Conception et installation du système d'humidification : Nous aborderons également les considérations de conception et d'installation pour assurer une intégration efficace du système d'humidification dans l'environnement de bureau, notamment :

II.2.4.1 Emplacement des humidificateurs : Les humidificateurs doivent être placés stratégiquement pour assurer une distribution uniforme de l'humidité dans tout le local, tout en évitant les zones de condensation et les dommages potentiels aux équipements.

II.2.4.2 Contrôle et régulation : Le système d'humidification doit être équipé de dispositifs de contrôle et de régulation pour maintenir le niveau d'humidité désiré en fonction des conditions ambiantes et des préférences des occupants. [22]

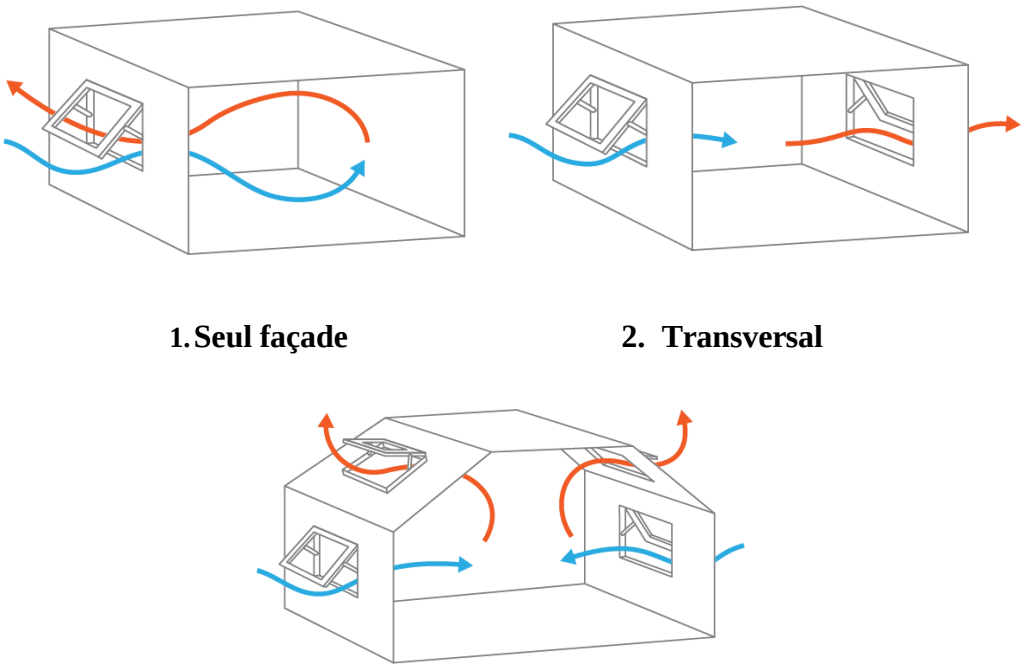
II.3 Ventilation :

II.3.1 Définition : Dans le cadre de ce projet, nous allons explorer les différentes facettes de la ventilation dans un bâtiment commercial moderne. La ventilation est un élément essentiel pour garantir la qualité de l'air intérieur, le confort des occupants et la santé publique. Nous aborderons les différents types de systèmes de ventilation, leurs composants et leur fonctionnement, ainsi que les considérations de conception pour optimiser l'efficacité énergétique et la performance globale du système.

II.3.2 Types de systèmes de ventilation : Dans cette section, nous examinerons plusieurs types de systèmes de ventilation couramment utilisés dans les bâtiments commerciaux :

II.3.2.1 Ventilation Naturelle : Ce système utilise les forces naturelles, telles que les vents et les différences de pression, pour faire circuler l'air à travers le bâtiment. Les ouvertures,

Comme les fenêtres et les portes, sont stratégiquement placées pour permettre un flux d'air adéquat.



1. **Seul façade** 2. **Transversal**

3. **tirage thermique**

Figure II.4: Ventilation naturelle. [23].

II.3.2.2 Ventilation mécanique simple flux : Ce système utilise un ventilateur pour extraire l'air vicié des espaces intérieurs, généralement par des conduits, tandis que l'air frais entre naturellement par des ouvertures dans le bâtiment.

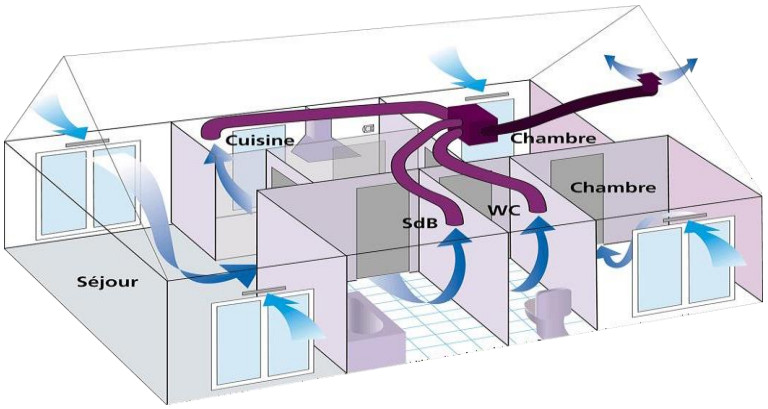


Figure II.5: Ventilation mécanique simple flux. [24]

II.3.2.3 Ventilation mécanique double flux : Ce système comprend à la fois un ventilateur d'extraction et un ventilateur d'admission contrôlés pour assurer un échange d'air contrôlé et efficace, en récupérant la chaleur de l'air extrait pour préchauffer l'air frais entrant.

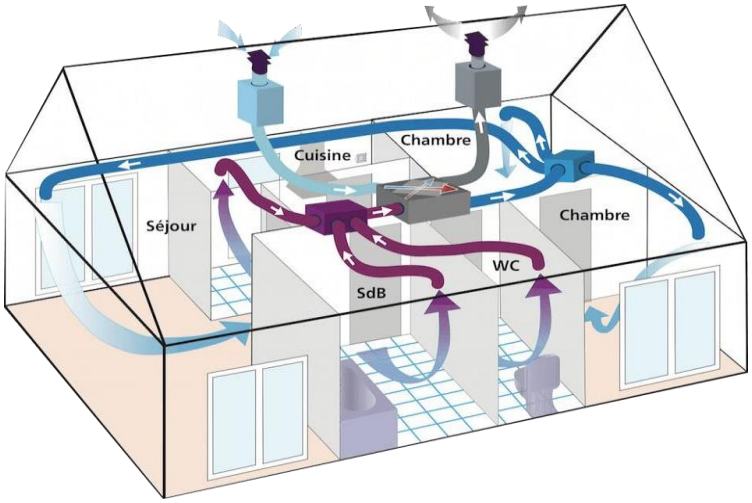


Figure II.6: Ventilation Mécanique Double Flux. [24]

II.3.3 Composants des systèmes de ventilation : Dans cette partie, nous détaillerons les principaux composants des systèmes de ventilation, tels que :

II.3.3.1 Ventilateurs : Les ventilateurs sont utilisés pour faire circuler l'air à travers les conduits et les espaces du bâtiment. Ils peuvent être de différents types, notamment centrifuges, axiaux ou hélicoïdaux, en fonction des besoins spécifiques du système.

II.3.3.2 Conduits : Les conduits acheminent l'air entre les différentes parties du bâtiment, assurant une distribution uniforme de l'air frais et vicié. Ils peuvent être en métal, en plastique ou en matériaux composites, en fonction des exigences de conception et des normes de sécurité.

II.3.3.3 Grilles et diffuseurs : Les grilles et les diffuseurs sont utilisés pour réguler le flux d'air entrant et sortant des espaces intérieurs, ainsi que pour diffuser l'air de manière uniforme dans les locaux.

II.3.4 Considérations de conception : Cette section mettra en lumière les considérations clés lors de la conception d'un système de ventilation efficace pour un bâtiment commercial, notamment :

II.3.4.1 Calcul des charges de ventilation : Il est essentiel d'estimer correctement les charges de ventilation, en tenant compte du nombre d'occupants, de l'activité humaine, de la densité d'occupation, etc.

II.3.4.2 Disposition des conduits : La disposition des conduits doit être soigneusement planifiée pour minimiser les pertes de charge et assurer une distribution homogène de l'air dans tout le bâtiment.

II.3.4.3 Contrôle et régulation : Les systèmes de ventilation doivent être équipés de dispositifs de contrôle et de régulation pour ajuster le débit d'air en fonction des besoins changeants du bâtiment et des occupants.

La ventilation est un élément crucial de la conception des locaux d'habitation de travail et d'effectue les tâches quotidiennes, contribuant à la santé, au confort et au bien-être des occupants. En comprenant les différents types de systèmes de ventilation, leurs composants et les considérations de conception associées, les professionnels du bâtiment peuvent Concevoir et mettre en œuvre des solutions efficaces pour garantir une qualité d'air. [25]

II.4 Climatisation :

II.4.1 Définition : La climatisation ou le conditionnement de l'air est la technique qui consiste à modifier, contrôler et réguler les conditions climatiques (température, humidité, niveau de poussières, etc.) d'un local pour des raisons de confort (bureaux, maisons individuelles) ou pour des raisons techniques (laboratoires médicaux, locaux de fabrication de composants électroniques, blocs opératoires, salles informatiques).

Les principales caractéristiques modifiées, contrôlées ou régulées sont :

• le degré de pollution de l'air ambiant (local à traiter) : renouvellement, soit par extraction forcée de l'air hors du local, soit par introduction forcée d'air neuf (air extérieur) dans le local, soit par renouvellement partiel de l'air ambiant pollué (adjonction d'un caisson de mélange) ;

• la température de l'air : modification en fonction des saisons (chauffer ou refroidir) ;

• le degré d'hygrométrie de l'air traité : humidification ou déshumidification (lié à la température, puisque l'air peut être d'autant plus humide, et donne la sensation d'être d'autant plus sec, qu'il est plus chaud) ;

• la teneur en poussières de l'air : traitement par filtration de l'air soufflé ou repris ;

• le maintien permanent de conditions intérieures (la régulation).

L'évolution de la climatisation, des simples ventilateurs aux systèmes sophistiqués de gestion de l'air, reflète l'ingéniosité humaine face aux défis environnementaux et énergétiques. À l'heure où la demande mondiale en climatisation explose, impulsée par des facteurs tels que l'urbanisation croissante, les changements climatiques et l'essor des technologies numériques, il est impératif de comprendre les enjeux énergétiques sous- jacents. En tant que processus thermodynamique complexe, la climatisation repose sur un contrôle intelligent de l'énergie pour créer des conditions intérieures confortables et saines. Toutefois, cette recherche du confort n'est pas sans conséquences. Les systèmes de climatisation représentent une grande partie de la consommation énergétique mondiale.

Dans cette introduction, nous plongerons dans les bases de la climatisation économe en énergie et explorerons les technologies émergentes telles que la géothermie, les systèmes de refroidissement solaire et la technologie de récupération de chaleur. Nous analyserons également les défis inhérents à l'optimisation des systèmes existants, notamment la conception de bâtiments durables, la gestion intelligente de la charge et l'intégration de solutions de stockage d'énergie.

En examinant de plus près ces aspects énergétiques, nous serons mieux à même de relever les futurs défis de la climatisation dans un monde en évolution rapide, où la durabilité et l'efficacité énergétique sont des impératifs essentiels.

II.4.2 Conception d'un système de climatisation : La conception d'un système de climatisation est un processus complexe qui nécessite une compréhension approfondie des besoins spécifiques de l'espace à climatiser, des contraintes environnementales et des principes de fonctionnement des systèmes de climatisation. Voici un aperçu des étapes clés de la conception d'un tel système :

II.4.2.1 Évaluation des besoins : La première étape consiste à évaluer les besoins de climatisation de l'espace en question. Cela comprend la détermination de la charge thermique, qui prend en compte les facteurs tels que la taille de l'espace, l'orientation du bâtiment, l'isolation, les équipements électriques, l'occupation humaine.

II.4.2.2 Sélection du système : En fonction des besoins identifiés, il faut choisir le type de système de climatisation le plus approprié. Cela peut inclure des systèmes de climatisation centralisés, des systèmes de climatisation à ventilation variable (VAV), des systèmes de climatisation à détente directe (DDC), des systèmes de refroidissement par évaporation.

II.4.2.3 Conception des composants : Une fois le type de système sélectionné, il faut concevoir les composants spécifiques du système, tels que les unités de traitement de l'air, les échangeurs de chaleur, les conduits de distribution d'air, les grilles de ventilation, les filtres, les contrôles de température.

II.4.2.4 Dimensionnement des équipements : Le dimensionnement approprié des équipements est essentiel pour assurer une performance optimale du système. Cela comprend le dimensionnement correct du compresseur, de l'évaporateur, du condenseur, du ventilateur, etc., en fonction de la charge thermique et des conditions ambiantes.

II.4.2.5 Conception du système de distribution d'air : La conception du système de distribution d'air doit garantir une distribution uniforme de l'air climatisé dans tout l'espace. Cela implique de déterminer la disposition des conduits, la taille des conduits, le placement des grilles de ventilation.

II.4.2.6 Intégration des contrôles : Les systèmes de climatisation modernes sont équipés de contrôles avancés pour réguler la température, l'humidité et d'autres paramètres. La conception du système doit intégrer ces contrôles pour assurer un fonctionnement efficace et confortable.

II.4.2.7 Évaluation de l'efficacité énergétique : Enfin, il est important d'évaluer l'efficacité énergétique du système de climatisation pour minimiser la consommation d'énergie et réduire l'empreinte carbone. Cela peut inclure l'utilisation de technologies de pointe telles que la récupération de chaleur, la ventilation à débit variable.

II.5 Conclusion :

L'humidification, la ventilation et la climatisation représentent des composantes cruciales de la gestion environnementale pour garantir le confort et le bien-être des occupants dans divers espaces.

Chapitre III : Méthodologie et Modèle mathématique

III.1 Introduction :

Ce chapitre traite de l'importance de la CFD dans la modélisation des systèmes de ventilation, climatisation et humidification dans un espace fermé, et il aborde également le modèle de turbulence et l'équation de diffusion des gaz. La source des polluants est représentée par le monoxyde de carbone. De plus, les équations de confort thermique, la conception de la chambre, les conditions aux limites et le réglage du maillage ont été inclus dans l'analyse de cette étude.

III.2 Équation gouvernante :

La Dynamique des Fluides Numérique (CFD) est la méthode de simulation d'un local fermé la plus avancée basée sur les équations de Navier-Stokes pour résoudre le champ de flux dans le domaine fluidique à l'intérieur d'une chambre. La CFD est utilisée dans cette étude comme un outil computationnel pour les simulations numériques, car elle inclut la modélisation en formulant un problème mathématique de physique. Des méthodes numériques sont utilisées pour résoudre le problème par la résolution des paramètres numériques à l'aide des équations spécifiques.

III.2.1 Modèle de turbulence : Le nombre de Reynolds est le produit des échelles de vitesse et de longueur représentatives divisé par la viscosité cinématique et caractérise les écoulements laminaires et turbulents. La plupart des écoulements de fluides rencontrés dans la pratique de l'ingénierie sont considérés comme turbulents, donc les simulations d'écoulement ont été principalement développées pour simuler et étudier les écoulements turbulents. Les équations de Navier-Stokes moyennées de Favre-Navier-Stokes sont utilisées pour prédire les écoulements turbulents, dans lesquelles les effets de la turbulence moyennée dans le temps sur les paramètres d'écoulement sont pris en compte.

Les lois générales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement angulaire et de l'énergie peuvent être écrites dans un repère cartésien tournant à une vitesse angulaire **Ω** autour d'un axe passant par l'origine du repère selon la forme de conservation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad \ldots\ldots (\mathrm{III}-1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i u_j\right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(C_{ij} + C_{ij}^R\right) + S_i \; ; i = 1,2,3 \quad \ldots\ldots (\mathrm{III}-2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j\left(C_{ij} + C_{ij}^R\right) + q_i\right) + \frac{\partial p}{\partial t} - C_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho\varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad \ldots\ldots (\mathrm{III}-3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} + \frac{5}{3}k - \frac{\Omega^2 r^2}{2} - \sum_m h_m^0 y_m, \quad \ldots\ldots (\mathrm{III}-4)$$

Les indices sont utilisés pour indiquer le regroupement à travers les trois directions de coordonnées. Dans cette étude, iln'y a pas de rotation du domaine d'écoulement et aucune résistance du milieu poreux. Par conséquent, ces termes sont fixés à zéro dans les simulations.

La tension de cisaillement visqueux pour les fluides newtoniens est définie comme :

$$C_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right) \ldots\ldots (\mathrm{III}-5)$$

Le tenseur de contrainte de Reynolds sous l'hypothèse de Boussinesq a la forme suivante :

$$C_{ij}^{R} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \ldots\ldots (\mathrm{III}-6)$$

Notez que μ et k sont nuls pour les écoulements laminaires. Dans le modèle de turbulence k-ε, μ est défini en utilisant deux propriétés de turbulence de base, à savoir, la dissipation turbulente ε et l'énergie cinétique turbulente k.

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad \ldots\ldots (\text{III-7})$$

Ici$f\mu$ est un facteur de viscosité turbulente. Il est défini par l'expression :

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165R_y)]^2 \times (1 + \frac{20.5}{R_T}) \quad \ldots\ldots (\text{III-8})$$

Ou :$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu\varepsilon}, R_y = \frac{\rho\sqrt{ky}}{\mu}$ ..... (III-9)

avec, y est la distance. Cette fonction permet de prendre en compte
la transition laminaire-turbulente. Deux équations de transport supplémentaires sont utilisées pour décrire l'énergie cinétique turbulente et la dissipation.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + S_k, \ldots\ldots (\mathrm{III}-10)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + S_\varepsilon, \ldots\ldots (\mathrm{III}-11)$$

Les termes sources Sk et $S\varepsilon$ sont définis comme :

$$S_k = C_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \mu_t P_B \ldots\ldots (\mathrm{III}-12)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k}\left(f_1 C_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B\right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \ldots\ldots \text{(III-13)}$$

Où PB représente la génération turbulente due aux forces de flottabilité et peut être écrite $P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i'}$ ..... (III-14) où gi est la composante de l'accélération gravitationnelle dans la direction ix, la constante σ = 0.9, et la constante CB est définie comme : CB = 1 lorsque PB>0, sinon 0 ;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3, f_2 = 1 - \exp(-R_T^2) \quad \ldots\ldots \text{(III-15)}$$

Les constantes $C\mu$, $C\varepsilon 1$, $C\varepsilon 2$, σk, $\sigma\varepsilon$ sont définies empiriquement. Dans ANSYS 2013, le valeurs typiques suivantes sont utilisées (ANSYS, 2013) :

$$C_{\mu} = 0.09, C_{s1} = 1.44, C_{s2} = 1.92, \sigma_k = 1.3, \sigma_s = 1$$

Où le nombre de Lewis Le = 1, le flux de chaleur diffusif est défini comme :

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial h}{\partial x_i}; i = 1,2,3 \ldots\ldots \text{(III-16)}$$

Ici, la constante σc = 0.9, Pr est le nombre de Prandtl et h est l'enthalpie. Ces équations décrivent à la fois les écoulements laminaires et turbulents. De plus, il est possible de passer d'un état à l'autre et vice versa. Les paramètres k et μ sont nuls pour des écoulements purement laminaires. [26]

III.2.2 Élément polluant :

L'élément polluant dans la pièce se diffuse sous forme gazeuse dans l'air ambiant, appelé fluide porteur. Comme la fraction massique du polluant y est minimale (y<<1), elle n'aura pas d'impact sur les propriétés de l'écoulement du fluide porteur. La distribution de l'élément polluant dans la pièce est modélisée en utilisant du logiciel. L'équation suivante intègre la concentration non uniforme de la substance et le gradient de pression du fluide porteur. [26]

$$\frac{\partial \rho y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\rho y u_i - \frac{\rho RT}{pm}\left(\frac{\mu}{p_r \cdot L_e} + \frac{\mu_t}{p_{r_t} \cdot L_{e_t}}\right)\frac{\partial y}{\partial x_i}\right] = \frac{\partial}{\partial x_i}\frac{m_1 m_2}{m^2}\left[-\frac{\rho y v_1 - y}{p}\left(\frac{\mu}{p_r \cdot L_e} + \frac{\mu_t}{p_{r_t} \cdot L_{e_t}}\right)\frac{\partial p}{\partial x_i}\right] \ldots\ldots \text{(III-17)}$$

III.3 ANSYS :

Voici un aperçu général de la façon d'aborder l'utilisation d'ANSYS CFD pour une simulation :

III.3.1 Prétraitement :

III.3.1.1 Importation de la géométrie : Commencez par importer la géométrie de votre système dans ANSYS.

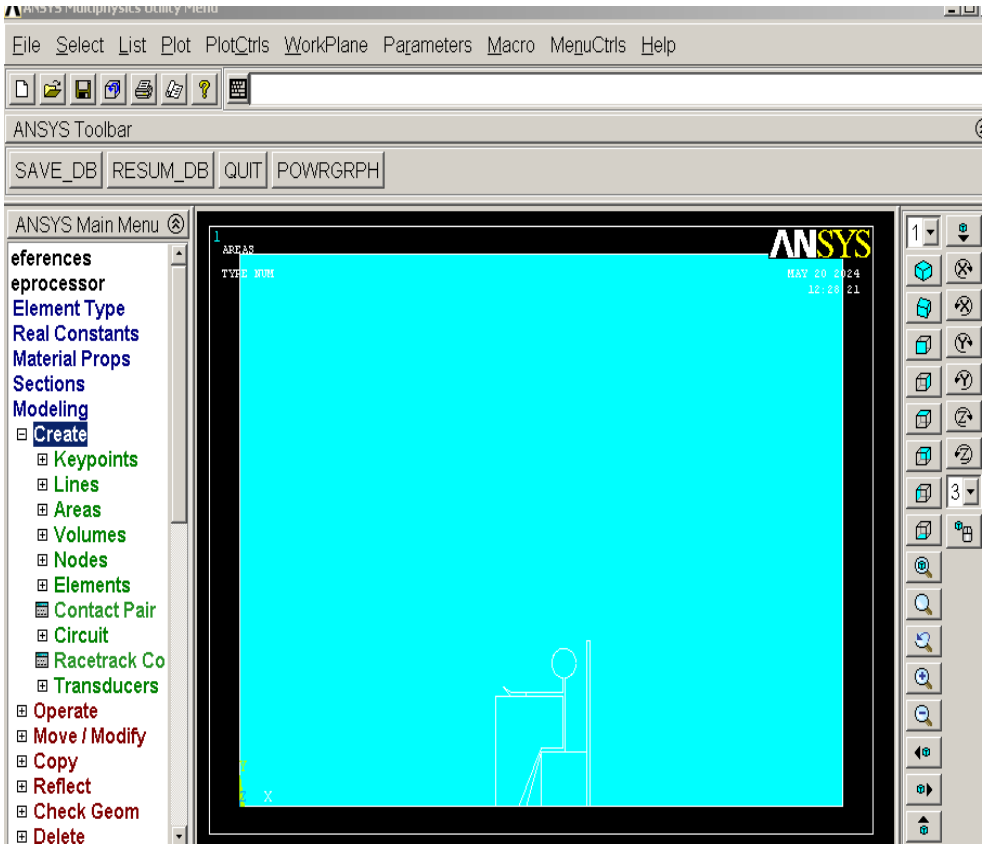


Figure III.1 : importer la géométrie de votre système dans ANSYS .

III.3.1.2 Génération de maillage : Créez un maillage qui discrétise la géométrie en éléments plus petits.

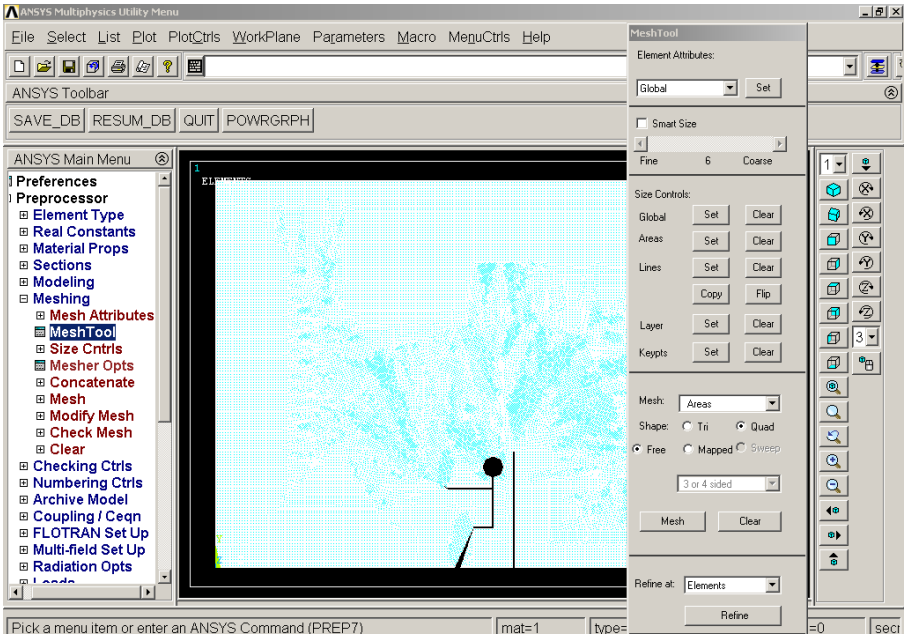


Figure III.2 : Créez un maillage qui discrétise la géométrie en éléments plus petits.

III.3.1.3 Conditions aux limites : Définissez les conditions aux limites de votre problème, y compris les conditions d'entrée/sortie, les conditions de paroi et tout autre paramètre pertinent.

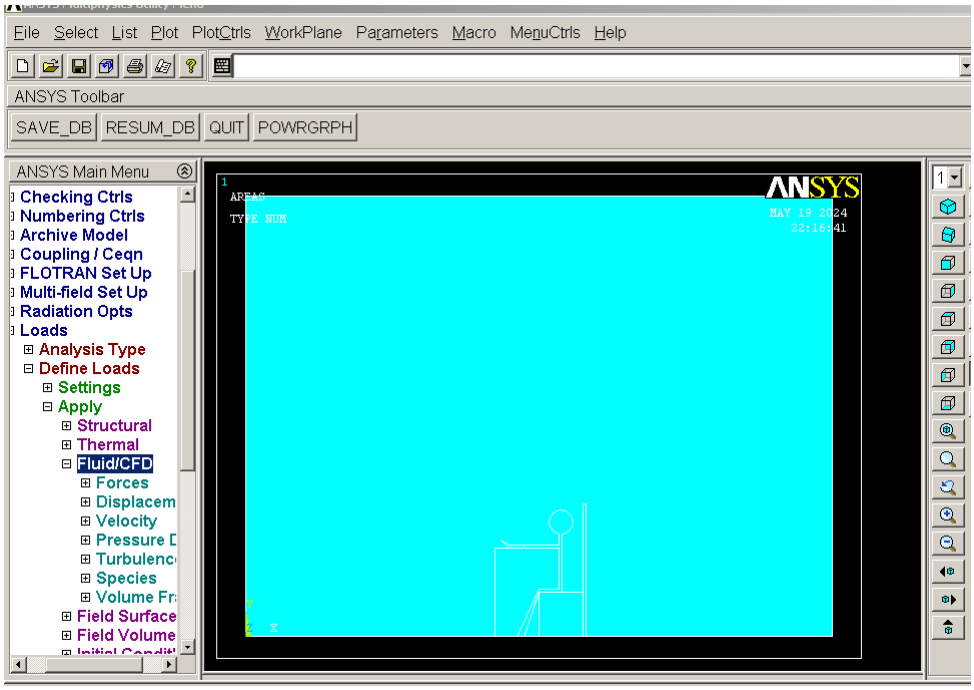


Figure III.3 : Définissez les conditions aux limites de votre problème.

III.3.2 Configuration du solveur :

III.3.2.1 Choix du solveur : Choisissez le solveur approprié pour votre problème. ANSYS propose plusieurs solveurs, chacun adapté à différents types de simulations (par exemple, écoulement stationnaire, transitoire, turbulent).

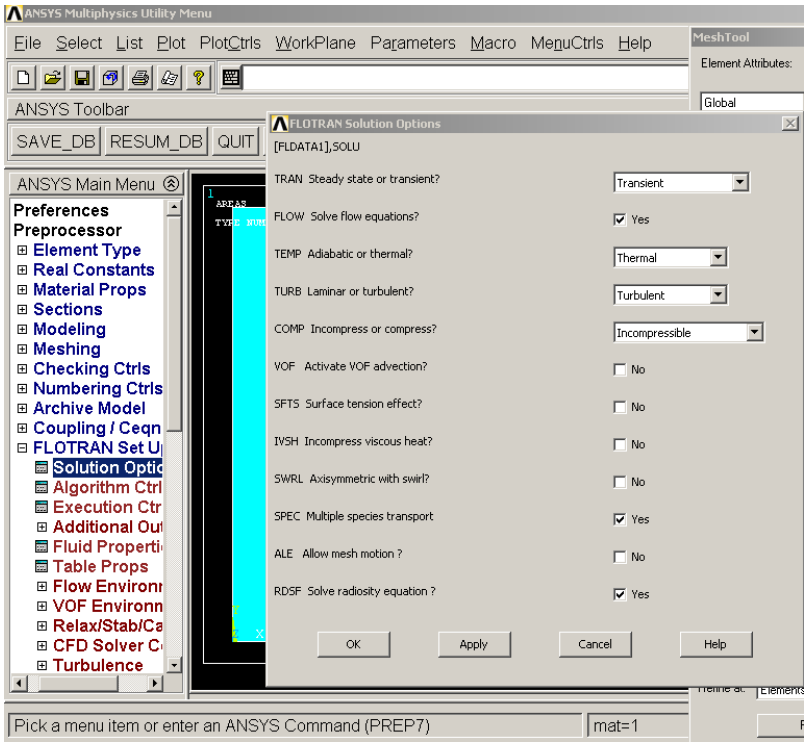


Figure III.4 : Choisissez le solveur approprié pour votre problème.

III.3.2.2 Configuration du modèle : Spécifiez les propriétés du fluide, le modèle de turbulence (si applicable) et tout autre modèle physique requis pour votre simulation.

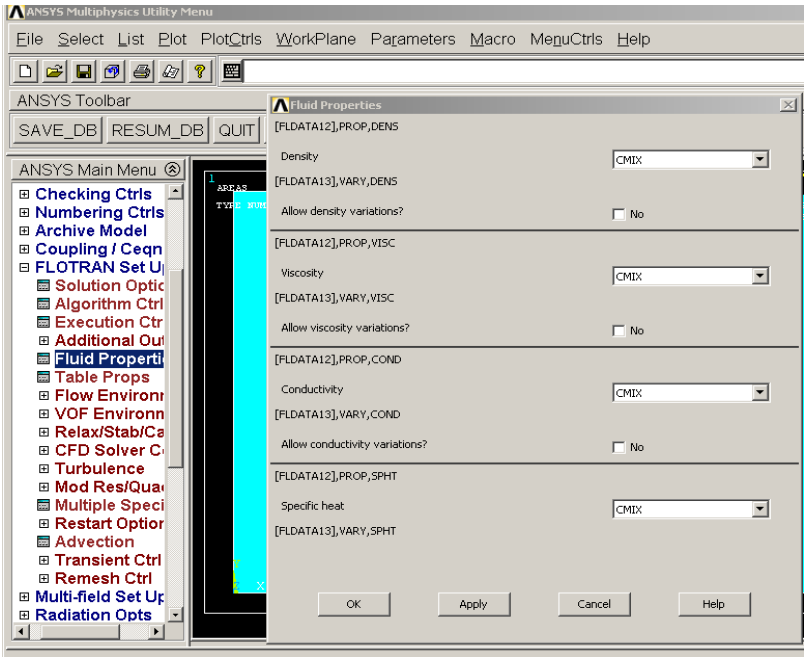


Figure III.5 : Spécifiez les propriétés du fluide**.**

III.3.2.3 Paramètres du solveur : Configurez les paramètres du solveur tels que les critères de convergence, les méthodes de solution et la taille de pas de temps (pour les simulations transitoires).

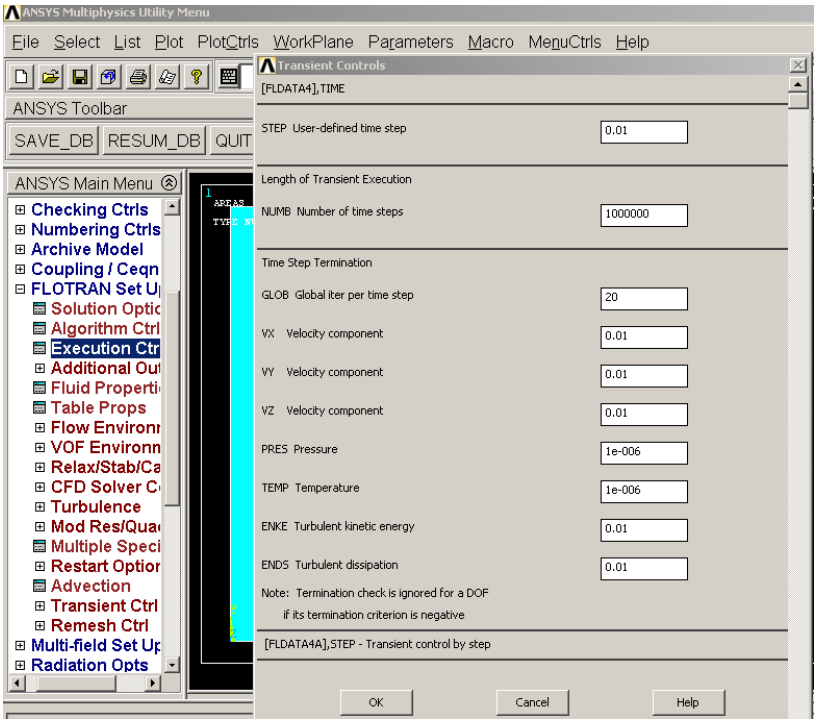


Figure III.6: Configurez les paramètres du solveur tels que les critères de convergence.

III.3.3 Solution :

III.3.3.1 Initialisation : Initialisez le champ de flux en utilisant soit une condition initiale définie par l'utilisateur, soit une estimation par défaut.

III.3.3.2 Lancer la simulation : Lancez la simulation et laissez le solveur itérer jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Surveillez la convergence pendant le processus de simulation.

III.3.3.3 Post-traitement : Visualisez les résultats à l'aide des outils de post-traitement d'ANSYS CFD. Cela peut inclure la génération de graphiques de contour, de lignes de courant, de vecteurs de vitesse et d'autres visualisations pour analyser le champ de flux.

III.3.4 Analyse :

III.3.4.1 Interprétation des résultats : Analysez les résultats de la simulation pour comprendre le comportement de l'écoulement du fluide et du transfert de chaleur dans votre système. [27]

III.3.4.2 Validation : Comparez les résultats de la simulation avec des données expérimentales ou des solutions analytiques, si disponibles, pour valider la précision de la simulation.

III.3.4.3 Analyse de sensibilité : Effectuez une analyse de sensibilité pour comprendre comment les changements dans les paramètres d'entrée affectent les résultats.

III.4 Caractéristique de l'étude :

Dans cette étude, l'approche repose sur des simulations réalisées par le module ANSYS méthode CFD configuré, visant à reproduire des conditions environnementales. Chaque simulation a ses propriétés spécifiques. Ces simulations permettent une analyse détaillée des interactions complexes entre ces différents aspects et leurs effets sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur. Cette méthodologie expérimentale offre ainsi une approche systématique pour explorer et comprendre les mécanismes sous-jacents à ces systèmes environnementaux cruciaux.

III.4.1 Géométrie (Domaine du contrôle) :

Au cours de notre étude, une conception d'une pièce d'un laboratoire a été développé. On trouve dans la pièce une table avec une chaise, La personne assise et le micro-ordinateur. L'air dans la chambre est conditionné et renouvelé par l'entrée, tandis que l'air exhalé est évacué par la sortie.la conception va étudier la distribution du flux avec des conditions spécifique dans chaque cas, une enquête a été réalisée pour illustrer comment ces conditions influencent l'environnement à l'intérieur de l'espace. [28]

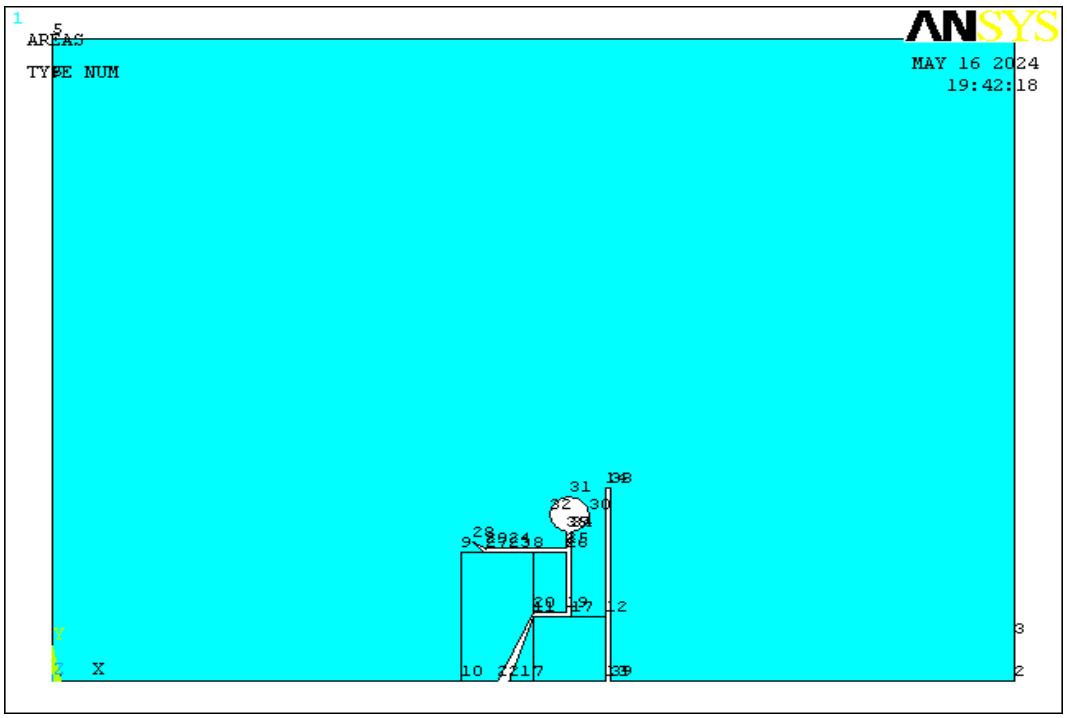


Figure III.7: Géométrie de la chambre.

III.4.2 Configuration du maillage :

Le logiciel ANSYS a été utilisé dans cette étude pour créer une grille structurée rectangulaire afin de capturer le comportement de l'environnement thermique et des particules de polluant. Le domaine a été divisé à travers un maillage computationnel aux axes du système de coordonnées globales cartésiennes pour former des rectangles appelés cellules avec un ensemble de plans orthogonaux. Tout d'abord, les cellules rectangulaires originales contenant des frontières. Le maillage de base est un maillage de cellules de niveaux grossiers, qui est construit pour l'ensemble du domaine au début du processus et formé en divisant le domaine par des plans parallèles en tranches orthogonales aux axes du système de coordonnées globales. [29]

III.4.2.1 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique largement utilisée pour résoudre des problèmes complexes de physique et d'ingénierie. Voici une description générale de la méthode des éléments finis **:**

- **Discrétisation du domaine :** Le domaine physique du problème est divisé en éléments finis géométriques simples, tels que des triangles ou des quadrilatères pour les problèmes en 2D, ou des tétraèdres ou des hexaèdres pour les problèmes en 3D. Ces éléments finis sont assemblés pour former un maillage qui représente le domaine de manière discrète.

- **Formulation des équations de comportement :** Les équations gouvernant le comportement physique du système sont exprimées sous forme d'équations aux dérivées partielles (EDP) ou d'équations d'équilibre. Ces équations peuvent provenir de lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, ou de l'énergie, selon la nature du problème**.**
- **Approximation des solutions :** Les solutions aux équations de comportement sont approximées par des fonctions de forme à l'intérieur de chaque élément fini. Cette approximation permet de représenter de manière approchée le comportement continu du système dans chaque élément.
- **Assemblage des matrices globales :** Les contributions de chaque élément fini aux équations globales du problème sont assemblées pour former un système d'équations algébriques. Cela implique d'appliquer les conditions aux limites et les conditions initiales appropriées.
- **Résolution du système d'équations** : Le système d'équations algébriques résultant est résolu numériquement pour obtenir les valeurs des variables inconnues à travers le domaine.

Post-traitement des résultats : Une fois les solutions obtenues, des analyses post- traitement peuvent être effectuées pour visualiser les résultats, extraire des données pertinentes et évaluer la performance du système**.** [30]

III.4.2.2 Optimisation du Maillage :

Dans le cadre de cette étude, le processus de maillage a été exécuté à deux reprises, la première itération ayant impliqué l'utilisation d'une taille d'élément légèrement plus grande. Cependant, cette approche initiale a entraîné des résultats moins précis en raison de la granularité insuffisante du maillage.

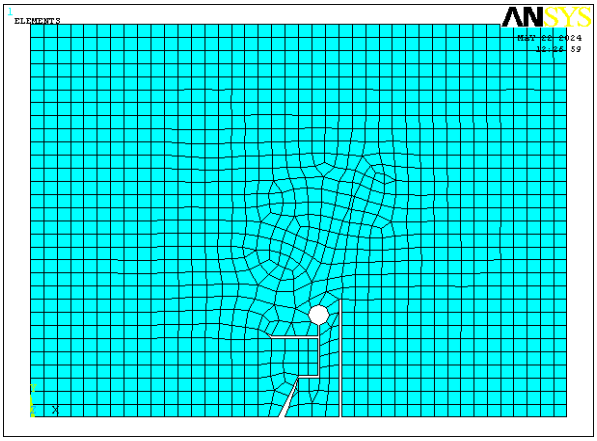


Figure III.8 : Maillage (taille d'élément = 0.1)

Pour la seconde itération, une diminution de l'ordre de dix fois de la dimension des éléments a été effectuée, permettant ainsi d'obtenir un maillage plus fin et plus précis.

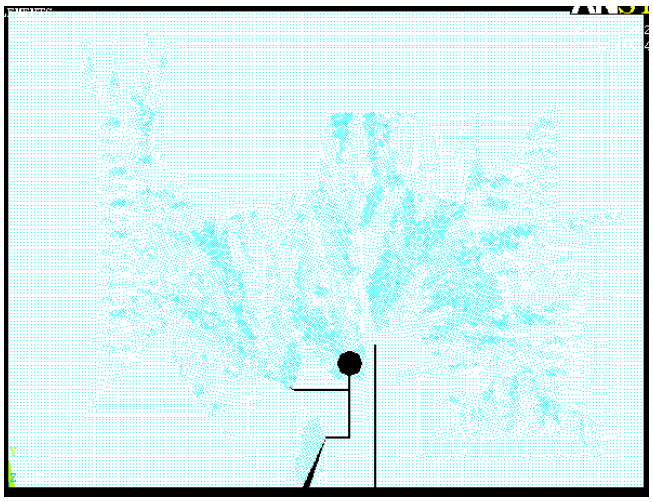


Figure III.9 : Maillage (taille d'élément = 0.01)

III.4.3 Condition aux limites :

Étant donné l'importance primordiale des conditions aux limites pour l'obtention de résultats désirables, il était impératif de les définir de manière précise. Une revue approfondie de la littérature a été entreprise à cette fin. Il est essentiel de maintenir la pression relative, qui a été ajustée à 0 atm à la sortie. De plus, les parois ont été considérées comme adiabatiques, ce qui signifie qu'aucun transfert ou stockage de chaleur n'est autorisé à l'intérieur. La température d'entrée de l'air a été fixée à 285 K, tandis que la température de transpiration humaine a été établie à 310 K, et celle du micro-ordinateur à 313 K. L'air évaporé a été traité à deux reprises : une première fois avec une vitesse suivant l'axe x (Vx
= 0.3, Vy = 0), et une seconde fois avec une vitesse suivant les axes x et y (Vx = 0.3, Vy = -0.3). L'air évaporé est composé de 80 % d'air sec et 20 % de vapeur d'eau, tandis que la transpiration humaine est entièrement constituée de vapeur d'eau, avec une vitesse de -0.1 m/s.

Après avoir mené une analyse dans les conditions précédentes, nous allons introduire un nouvel élément polluant, à savoir le monoxyde de carbone (CO). Ce polluant est représenté par le mélange de produits chimiques, expiré à une température de 348 K et à une vitesse de 0.1 m/s selon l'axe y. Des simulations en régime permanent ont été conduites afin d'évaluer la distribution spatiale du polluant dans l'environnement étudié. De plus, l'efficacité du système de ventilation pour éliminer ce polluant a été évaluée.

III.5 Conclusion :

Ce chapitre met en lumière les défis rencontrés lors de la modélisation numérique en mécanique des fluides, même pour des problèmes en apparence simples. En effet, les étapes de ce processus, telles que la création et la génération du maillage, ainsi que l'implémentation du problème dans le logiciel "ANSYS", présentent des complexités notables. De plus, l'exploration des nombreux paramètres ajustables offerts par le logiciel " nous a permis d'adopter une approche de résolution optimale.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

IV.1 Introduction :

Dans cette étude, nous avons utilisé l'outil ANSYS APDL CFD (Computationnel Fluide Dynamics) pour modéliser et analyser un écoulement biphasique miscible dans un local. Nous avons commencé par définir la géométrie du local fermé, y compris les dimensions, les ouvertures pour la ventilation et les emplacements des sources de chaleur ou de pollution. Ensuite, nous avons déterminé les conditions aux limites, telles que la température et la vitesse initiales des fluides, ainsi que les propriétés des fluides eux- mêmes. Fermé.

À l'aide de l'outil ANSYS APDL CFD, nous avons résolu les équations fondamentales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour les deux phases en interaction. Nous avons utilisé des modèles de turbulence appropriés pour prendre en compte les effets de mélange et de dispersion dans l'écoulement.

IV.2 Discussion des résultats :

De plus, nous avons analysé l'influence de paramètres tels que la vitesse de ventilation, les sources de chaleur et les propriétés des fluides sur la dynamique de l'écoulement et le confort thermique à l'intérieur du local fermé.

Les paramètres de local sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeurs
Surface de la pièce	4.5 ×3 m^2
Température de soufflage	12 + 273 k
Température de transpiration d'humain	37 + 273 k
Température du corps humain	37 + 273 k
Température de micro-ordinateur	40 + 273 k
Température de la dispersion de polluant (CO)	75 + 273 k
Vitesse de transpiration humain	-0.1 m/s
La pression de sortie de l'air	0 atm

Tableau IV.1 : Tableau de paramètre du local.

Les caractéristiques des spécimens :

Propriété	Spécimen 1 (Air sec)	Spécimen 2 (Vapeur d'eau)	Spécimen 3 (CO)
Densité (kg/m3)	2.038	4.49	1.25
Viscosité (kg m^{-1} s^{-1})	$1.189\ 10^{-5}$	$1.7\ 10^{-5}$	$1.96\ 10^{-5}$
Conduction thermique (w m^{-1} k^{-1})	$1.582\ 10^{-2}$	$2.54\ 10^{-2}$	$2.62\ 10^{-2}$
Chaleur spécifique (J kg^{-1} k^{-1})	966	3406.9	1039

Tableau IV.2 : tableau de caractéristique des spécimens.

En ajoutant des détails supplémentaires :

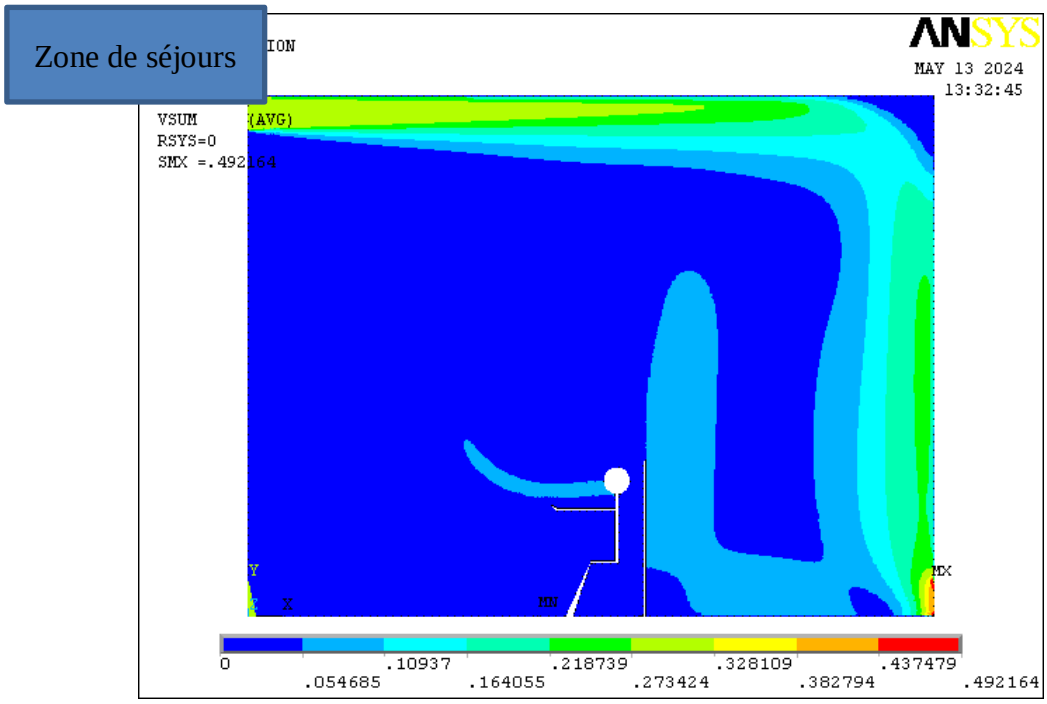
L'air soufflé dans la pièce est de : 80 % d'air sec et 20 % de vapeur d'eau.

La transpiration de l'humain est de :100% de vapeur d'eau.

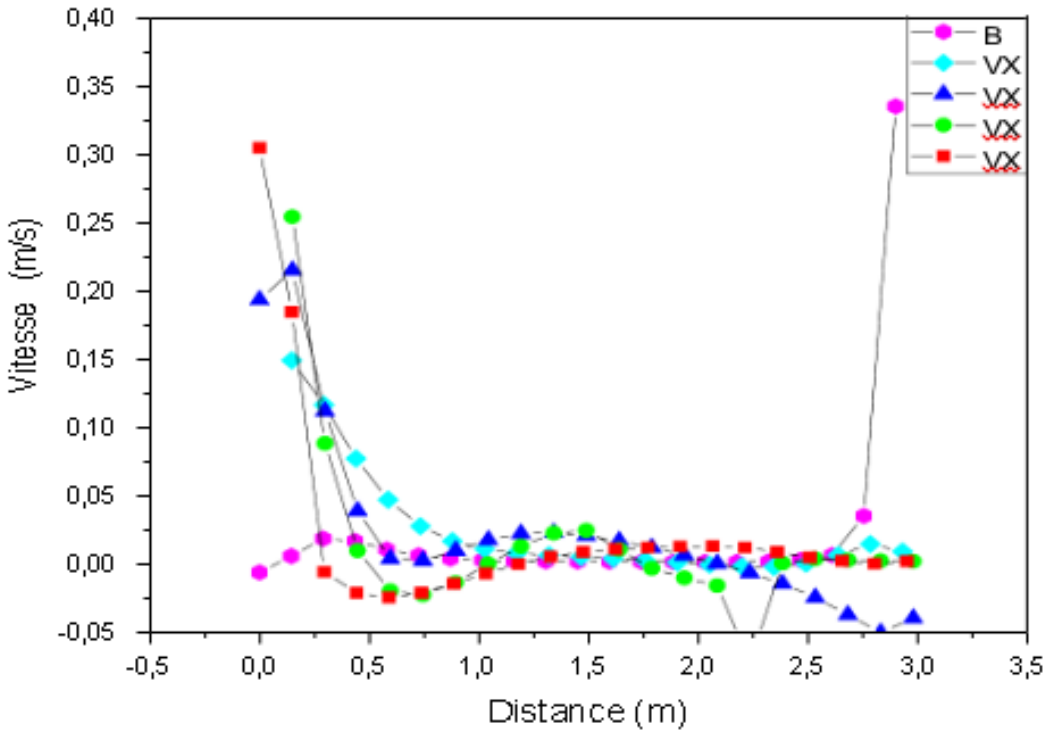
IV.2.1 Discussion des résultats du premier cas :

Comme précédemment évoqué, chaque conception est caractérisée par ses paramètres spécifiques, engendrant des variations tant dans les conditions d'évaporation que dans les configurations de sortie d'air. Dans cette configuration particulière, le champ de vitesse présente une composante cartésienne suivant l'axe x (Vx=0.3), avec une absence de composante selon l'axe y (Vy=0). De plus, l'extraction de l'air s'effectue sous la paroi, contribuant ainsi à la dissipation du flux thermique dans l'environnement. Comme indiqué dans les **Figures IV.1**.

IV.2.1.1 Vitesse :



Figures IV.1 : Variation de champs des vitesses**.**



Figures IV.2 : Graphe de variation de champs des vitesses.

Remarque :

Les figures de v1 à v5 tracent l'évolution de la vitesse en fonction de la distance, chacune décrivant méticuleusement cette relation dans un cadre longitudinal rectiligne. Ces graphiques révèlent la nature changeante de la vitesse le long d'un parcours spécifique.

La ligne longitudinale se déploie verticalement du plafond jusqu'au sol de la pièce, tandis que les cinq trajectoires s'étendent de façon transversale du mur gauche au mur droit, comme illustré dans **la figure IV.3**.

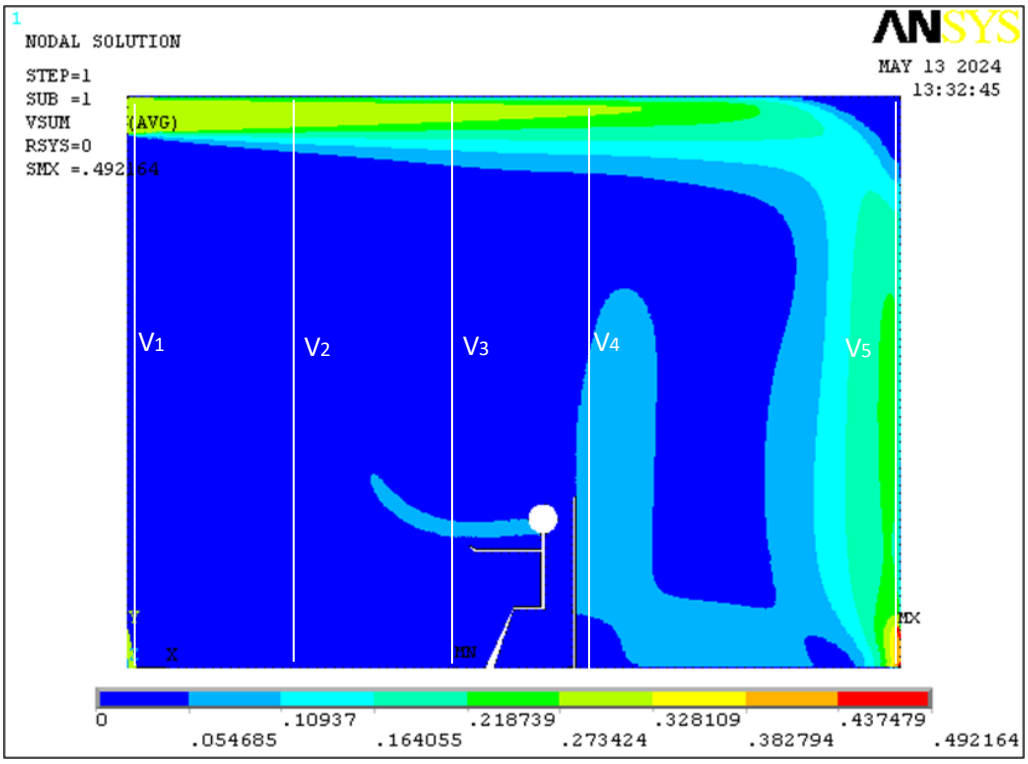
V_1 : Le processus débute au point d'émergence de l'évaporation, où la vitesse initiale de soufflage est établie à 0.3 m/s. Par la suite, le champ de vitesse décroît graduellement jusqu'à atteindre une valeur de vitesse égale à 0.7 m/s à une distance de 0.25 m descendant du plafond. À une distance de 0.3 m, la vitesse devient nulle jusqu'au sol.

V_2 : Le processus s'amorce à partir du point le plus proche du plafond, où la vitesse initiale été à 0.2 m/s. Par la suite, la vitesse décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 0.1 m/s à une distance de 0.25 m sous le plafond. À une distance de 0.4 m, la vitesse devient nulle, puis augmente jusqu'à atteindre 0.025 m/s à une distance de 1.5 m. Ensuite, la vitesse se stabilise à 0 m/s jusqu'au niveau du sol.

V_3 : Le processus s'amorce à partir du point le plus proche du plafond, où la vitesse initiale est fixée à 0.25 m/s. Par la suite, la vitesse augmente un petit peux jusque 0.25 m/s aune distance de 0.25 m, juste là la vitesse décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 0.05 m/s à une distance de 0.5 m en dessous le plafond. À une distance de 0.7m, la vitesse devient nulle, puis augmente jusqu'à atteindre 0.025 m/s à une distance de 1.5 m. Ensuite, la vitesse se stabilise à 0 m/s jusqu'au niveau du sol.

V_4 : Le processus débute au point d'émergence de l'évaporation, où la vitesse est établie à 0.15 m/s. Par la suite, la vitesse décroît graduellement jusqu'à devient nulle à une distance de 1 m descendant du plafond jusqu'au sol.

V_5 : Le processus débute avec une vitesse nulle le long d'une distance de 2.5 m/s Par la suite, la vitesse augment a une valeur de 0.05 m/s au niveau de la sortie de l'air jusqu'à elle atteindre 0.35 m/s.



Figures IV.3 : Représentation de V1 à V5 dans le champ de vitesse.

IV.2.1.2 Température :

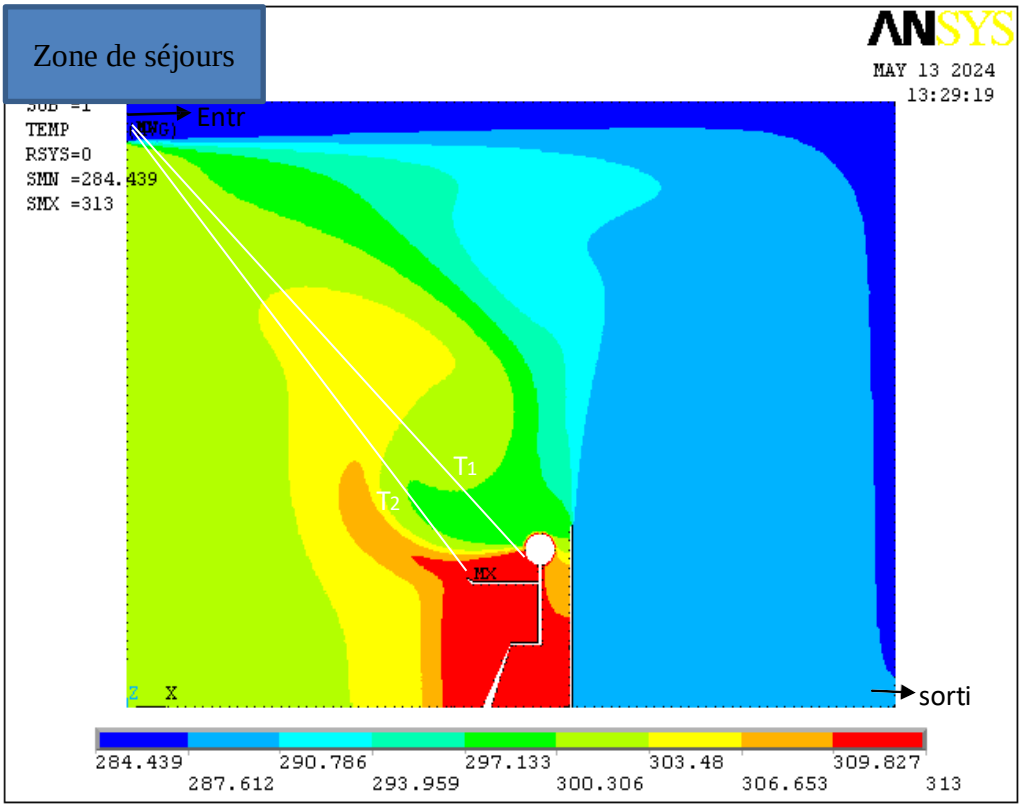


Figure IV.4 : La variation de champ de la température.

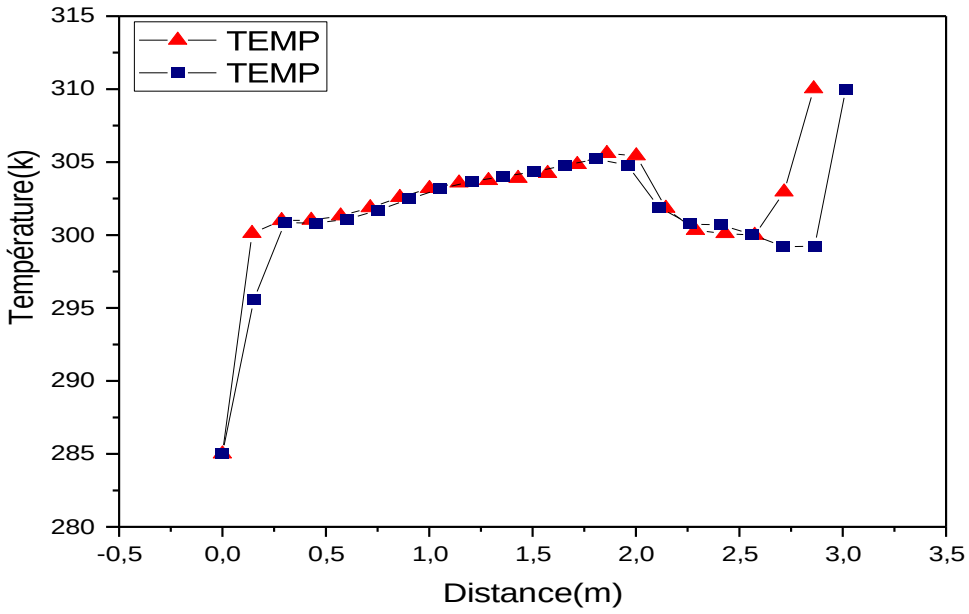


Figure IV.5 : Graphe de La variation du champ de la température.

Remarque :

Les graphes représentent la variation de la température tout au long de la ligne allant de point de soufflage à la bouche de la personne pour (T1) et jusque micro-ordinateur pour (T2).

T_1 : La température croît de manière proportionnelle à la distance jusqu'à atteindre 300K à 0.4 m de la source. Ensuite, elle augmente graduellement pour atteindre 305K à 2 m de distance. Par la suite, la température diminue pour atteindre 297K à 3 m de distance avant de remonter près de la bouche de la personne à une température de 310K.

T_2 : : La température croît de manière proportionnelle à la distance jusqu'à atteindre 300K à 0.25 m de la source. Ensuite, elle augmente graduellement pour atteindre 305K à 2 m de distance. Par la suite, la température diminue pour atteindre 297K à 2.5 m de distance avant de remonter près de la bouche de la personne à une température de 310K

IV.2.1.3 Récapitulation des résultats :

À partir des données visuelles et des tracés graphiques, nous pouvons conclure que le système présente une inefficacité notable dans ses caractéristiques actuelles. En effet, la température élevée semble se concentrer de manière significative autour de l'occupant, suggérant un environnement thermique peu confortable. D'autre part, l'examen du profil de vitesse révèle que l'émission d'air traité s'effectue initialement depuis le haut du plafond, puis suit une trajectoire descendante le long du mur situé derrière l'individu, avant de s'échapper par l'orifice de sortie d'air. Ce schéma laisse ainsi entendre que le reste de la pièce demeure largement non affecté, mettant en évidence une absence totale de traitement thermique dans l'environnement environnant.

IV.2.2 Discussion des résultats du deuxième cas :

Comme précédemment évoqué, chaque conception est caractérisée par ses paramètres spécifiques, engendrant des variations tant dans les conditions d'évaporation que dans les configurations de sortie d'air. Dans cette configuration particulière, le champ de vitesse présente une composante cartésienne suivant l'axe x (Vx=0.3), et une composante cartésienne suivant l'axe y (Vy=-0.3). De plus, l'extraction de l'air s'effectue sous la paroi, contribuant ainsi à la dissipation du flux thermique dans l'environnement. Comme indiqué dans la Figure IV.6.

IV.2.2.1 Vitesse :

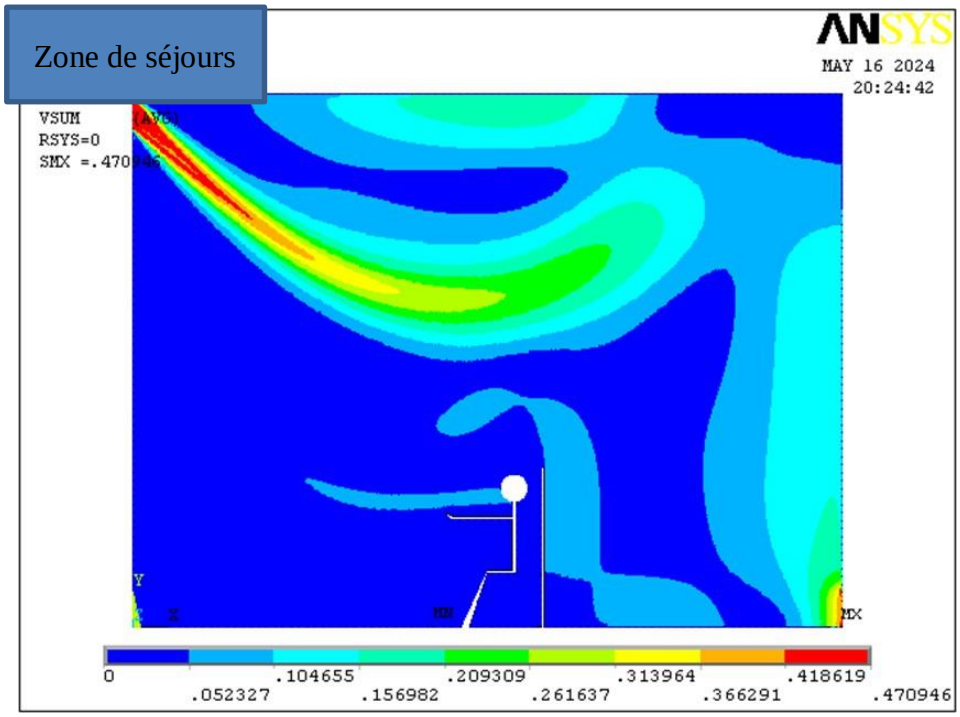


Figure IV.6 : La variation du champ de la vitesse.

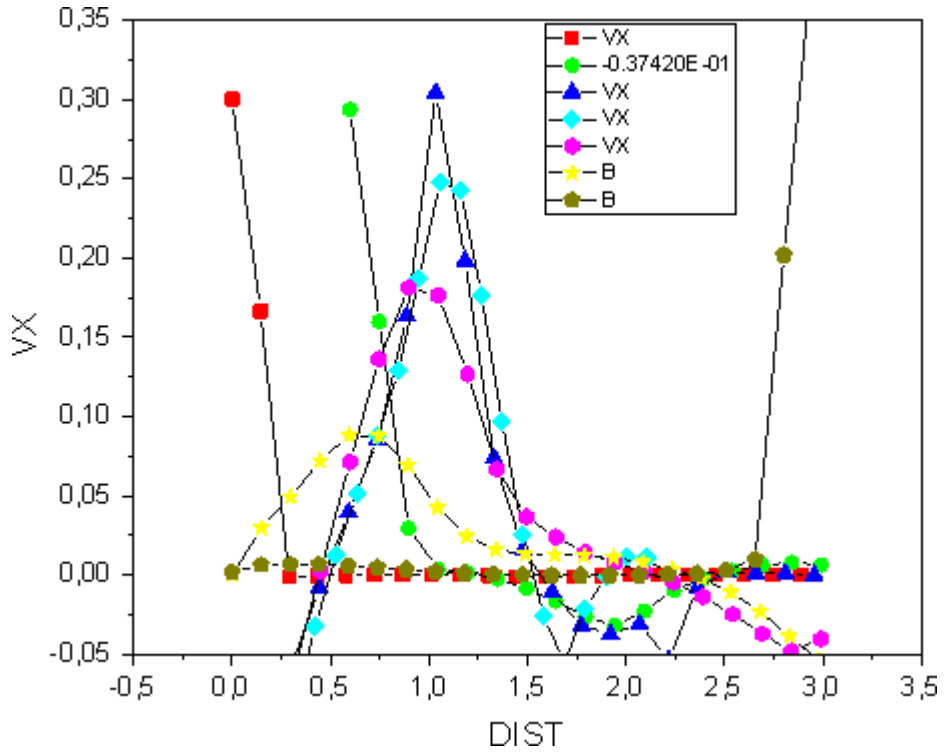


Figure IV.7 : Graphe de La variation du champ de la vitesse.

Remarque :

Les figures de V_1 à V_7 tracent l'évolution de la vitesse en fonction de la distance, chacune décrivant méticuleusement cette relation dans un cadre longitudinal rectiligne. Ces graphiques révèlent la nature changeante de la vitesse le long d'un parcours spécifique.

La ligne longitudinale se déploie verticalement du plafond jusqu'au sol de la pièce, tandis que les sept trajectoires s'étendent de façon transversale du mur gauche au mur droit, comme illustré dans **la figure IV.3**.

V1 : Le processus commence dès le point initial de vaporisation, caractérisé par une vitesse initiale de 0.3 m/s. Progressivement, cette vitesse décélère jusqu'à atteindre la nullité à une distance de 0.4 m, puis demeure constamment nulle sur toute la ligne.

V2 : Le processus commence dès le point initial de vaporisation, caractérisé par une vitesse initiale de 0.3 m/s. Progressivement, cette vitesse décélère jusqu'à atteindre la nullité à une distance de 1 m, puis demeure constamment nulle sur toute la ligne.

V3 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une distance de 1 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.5 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V4 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une distance de 1 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.7 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V5 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une distance de 0.8 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.8 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V6 : Le processus démarre par une phase d'accélération, où la vitesse augmente graduellement de 0 m/s jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.1 m/s à une distance de 0.6 m. Ensuite, une phase de décélération s'ensuit, avec la vitesse diminuant progressivement jusqu'à son annulation complète à une distance de 1.3 m, maintenant cette nullité pour le reste de la durée de l'événement observé.

V7 : Initialement, la vitesse demeure constamment nulle le long de la trajectoire, jusqu'à ce qu'une distance de 2.6 m soit atteinte. À partir de ce point, une phase d'accélération s'engage, propulsant la vitesse jusqu'à atteindre un pic de 0.35 m/s.

IV.2.2.2 Température :

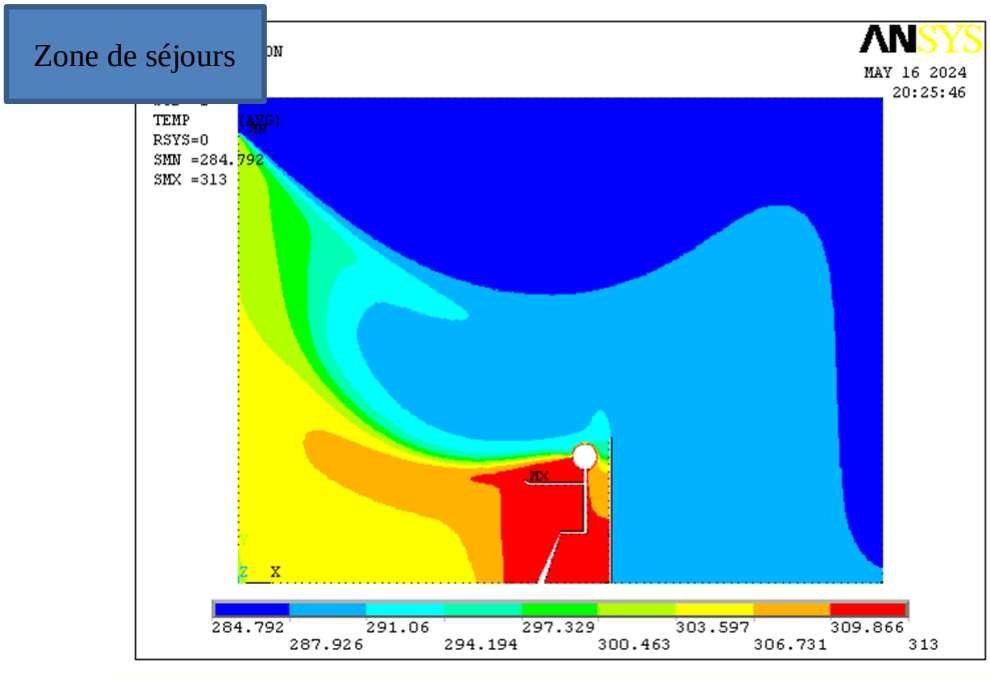


Figure IV.8 : La variation du champ de la température.

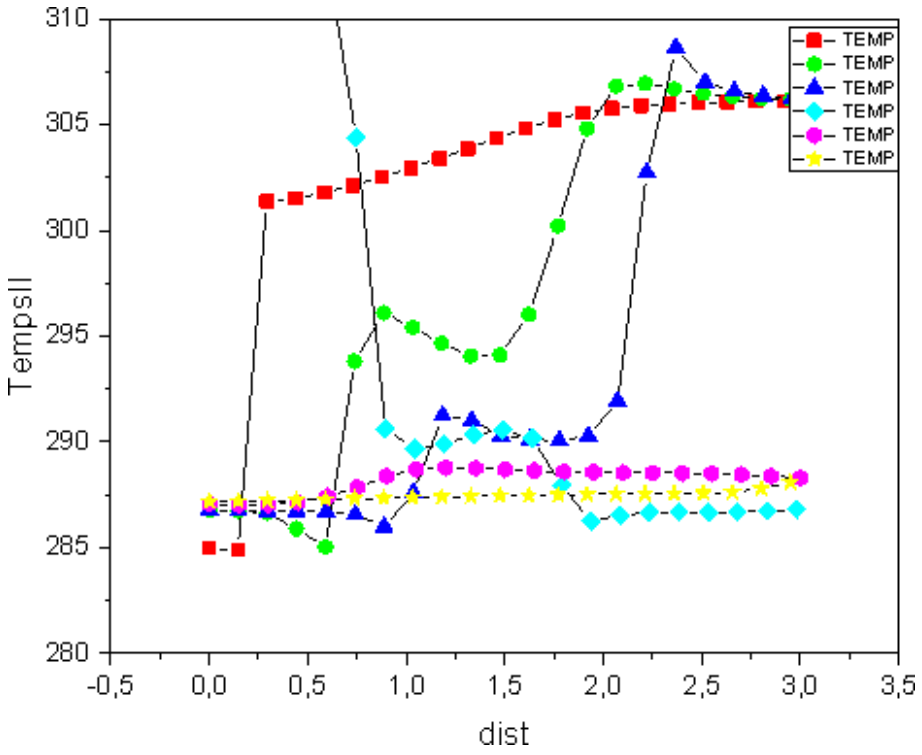


Figure IV.9 : Graphe de La variation du champ de la température.

Remarque :

Les graphes représentent la variation de la température tout au long de la ligne allant du plafond descende au sol.

T1 : Initialement, la température est maintenue à 285K sur la plage allant de 0 à 0.2 m. Ensuite, elle connaît une élévation progressive jusqu'à atteindre 300K à une distance de 0.3 m. Ce processus d'augmentation se poursuit, conduisant à une température finale de 310K au niveau du sol.

T2 : La température initiale est maintenue à 285K sur la première moitié de la trajectoire, s'étendant de 0 à 0.5 m. Ensuite, elle subit une progression jusqu'à atteindre 295K à une distance de 1 m. Cette hausse est suivie d'une diminution, ramenant la température à 293K à 1.6 m. Par la suite, elle connaît une nouvelle ascension jusqu'à 305K à 2 m, restant stable à cette valeur le long du reste de la ligne.

T3 : La température reste constante à 287K sur une distance de 1 m. Ensuite, elle augmente progressivement pour atteindre 292K à 1.2 m, suivie d'une légère diminution jusqu'à 290K à 2 m. Par la suite, elle connaît une montée jusqu'à 309K à 2.5 m, puis une nouvelle diminution pour revenir à 305K au niveau du sol.

T4 : La température initiale est fixée à 310K à une distance de 0.5 m, puis elle décroît jusqu'à 290K à 1 m. Elle demeure constante à cette valeur jusqu'à 1.6 m, puis diminue à nouveau pour atteindre 285K à 2 m, conservant cette température jusqu'au sol.

T5 : La température demeure stable à 287K sur une distance de 0.6 m, suivie d'une légère augmentation jusqu'à 290K à 1 m. Ensuite, une légère diminution s'ensuit, puis la température se stabilise à nouveau à 287K.

T6 : La température demeure constante tout au long de la trajectoire, maintenant une valeur de 287.5K.

IV.2.2.3 Récapitulation des résultats :

Suite à l'intégration de la composante y à la vitesse, une modification significative du flux d'air dans l'espace est observée, avec une expansion notable du champ de flux. Néanmoins, une problématique perdure, car l'accumulation de la haute température persiste autour du point d'assise de l'individu, maintenant ainsi un niveau de confort thermique insatisfaisant. Cette observation suggère que le système demeure inefficace dans sa capacité à procurer un environnement ergonomique pour l'utilisateur.

IV.2.3 Discussion des résultats du troisième cas :

Comme précédemment évoqué, chaque conception est caractérisée par ses paramètres spécifiques, engendrant des variations tant dans les conditions d'évaporation que dans les configurations de sortie d'air. Dans cette configuration particulière, le champ de vitesse présente une composante cartésienne suivant l'axe x (Vx=0.3), avec une absence de composante selon l'axe y (Vy=0). De plus, l'extraction de l'air s'effectue sous le mur et aussi par une deuxième position située sous le bureau, contribuant ainsi à la dissipation du flux thermique dans l'environnement. Comme indiqué dans les Figures IV.11.

IV.2.3.1Vitesse :

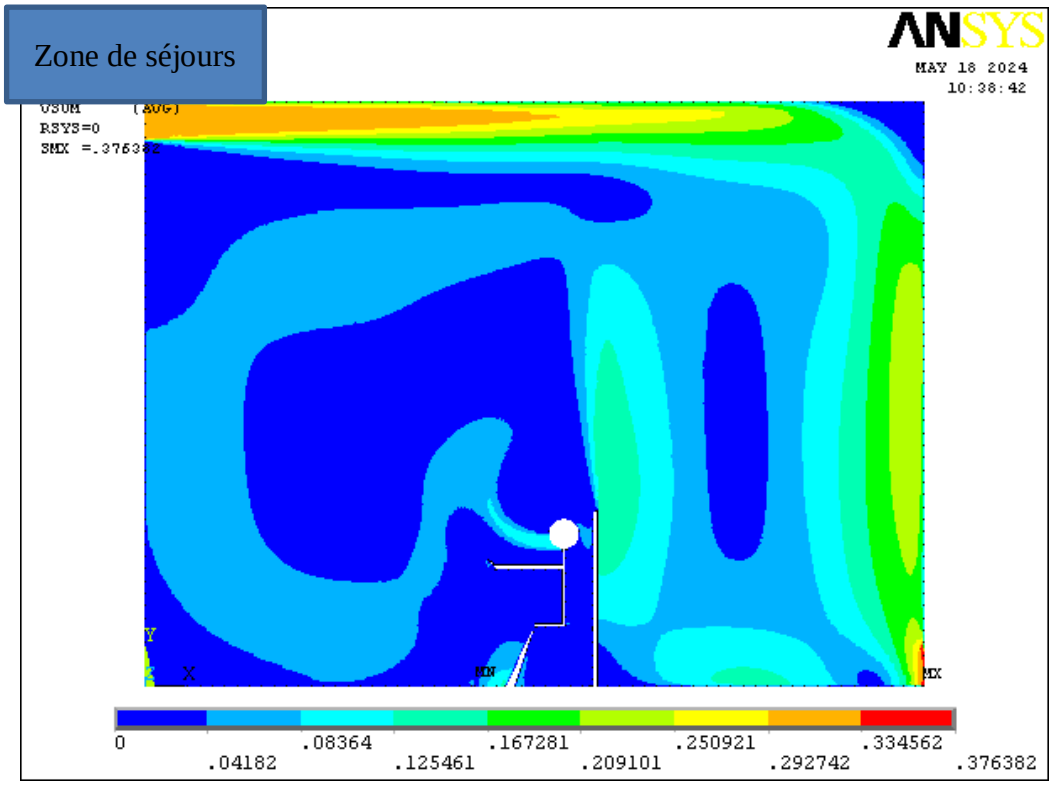


Figure IV.10 : La variation du champ de la vitesse.

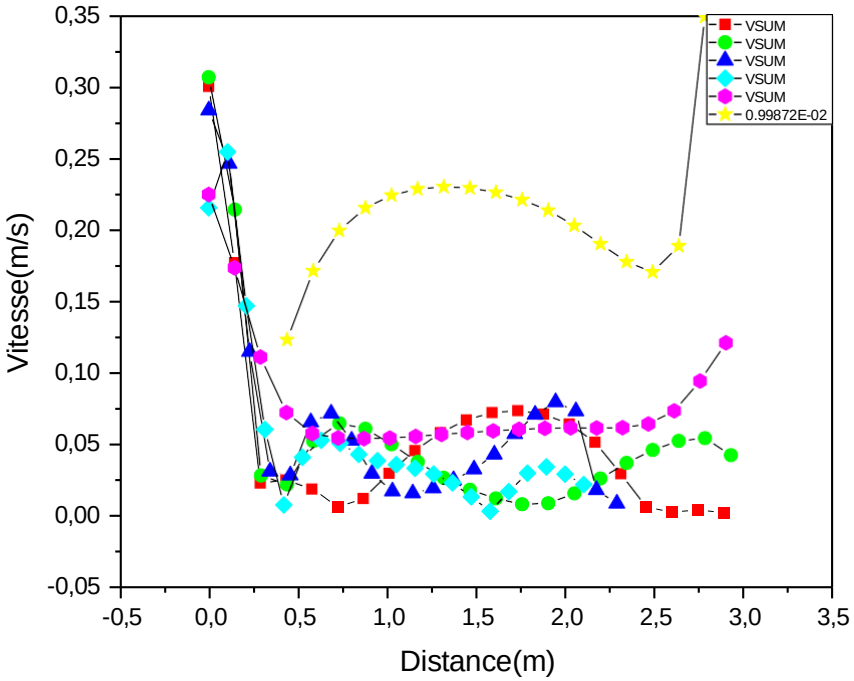


Figure IV.11 : graphe de La variation du champ de la vitesse.

Remarque :

Les figures de V1 à V6 tracent l'évolution de la vitesse en fonction de la distance, chacune décrivant méticuleusement cette relation dans un cadre longitudinal rectiligne. Ces graphiques révèlent la nature changeante de la vitesse le long d'un parcours spécifique.

La ligne longitudinale se déploie verticalement du plafond jusqu'au sol de la pièce, tandis que les six trajectoires s'étendent de façon transversale du mur gauche au mur droit, comme illustré dans la figure IV.3.

V1 : Le processus commence dès le point initial de vaporisation, caractérisé par une vitesse initiale de 0.3 m/s. Progressivement, cette vitesse décélère jusqu'à atteindre la nullité à une distance de 0.4 m, puis demeure constamment nulle sur toute la ligne.

V2 : Le processus commence dès le point initial de vaporisation, caractérisé par une vitesse initiale de 0.3 m/s. Progressivement, cette vitesse décélère jusqu'à atteindre la nullité à une distance de 1 m, puis demeure constamment nulle sur toute la ligne.

V3 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une

distance de 1 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.5 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V4 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une distance de 1 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.7 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V5 : au début la vitesse soit nulle jusqu'à ce qu'une distance de 0.4 m soit atteinte. À partir de ce point, la vitesse commence à croître progressivement, culminant à 0.3 m/s à une distance de 0.8 m, avant de décélérer jusqu'à annulation complète à 1.8 m de distance, maintenant cette nullité tout au long du reste de la ligne.

V6 : Le processus démarre par une phase d'accélération, où la vitesse augmente graduellement de 0 m/s jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.1 m/s à une distance de 0.6 m. Ensuite, une phase de décélération s'ensuit, avec la vitesse diminuant progressivement jusqu'à son annulation complète à une distance de 1.3 m, maintenant cette nullité pour le reste de la durée de l'événement observé.

V7 : Initialement, la vitesse demeure constamment nulle le long de la trajectoire, jusqu'à ce qu'une distance de 2.6 m soit atteinte. À partir de ce point, une phase d'accélération s'engage, propulsant la vitesse jusqu'à atteindre un pic de 0.35 m/s.

IV.2.3.2 Température :

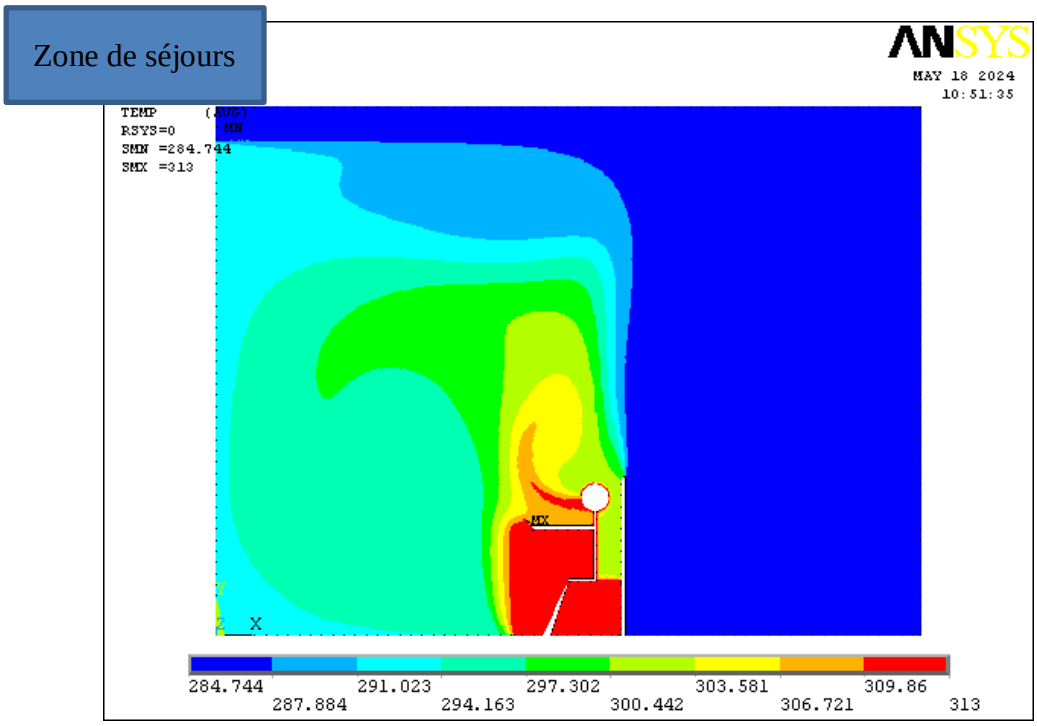


Figure IV.12 : La variation du champ de la température.

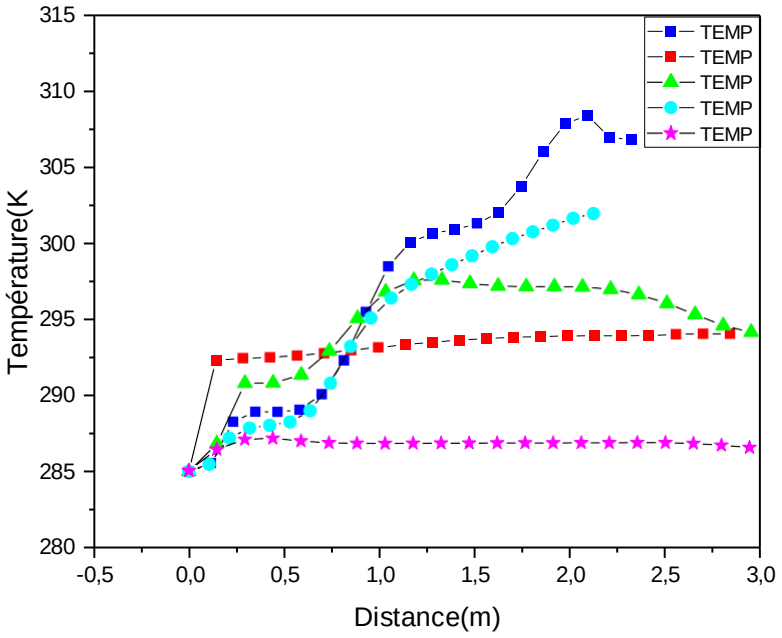


Figure IV.13 : graphe de La variation du champ de la température.

Remarque :

Chaque graphe représente la variation de la température tout au long de la ligne allant du plafond descende au sol.

T1 : À la température initiale de 285 K au point de soufflage, on observe une tendance à l'élévation progressive jusqu'à l'atteinte de 293 K à une distance de 0.2 m, suivie par une stabilisation à cette valeur tout au long de la trajectoire jusqu'au sol.

T2 La température initiale de 285 K connaît une augmentation progressive jusqu'à 291 K à une distance de 0.3 m, suivie d'une seconde augmentation jusqu'à 297 K à 1 m. Par la suite, elle connaît une légère baisse, atteignant une valeur de 295 K au niveau du sol.

T3 : La température initiale de 285 K connaît une légère augmentation jusqu'à 288 K à une distance de 0.2 m, puis se stabilise à cette valeur jusqu'à 0.6 m. Ensuite, elle connaît une nouvelle augmentation, atteignant 302 K à 1.2 m, restant constante jusqu'à 1.7 m, puis augmentant à nouveau jusqu'à 310 K au niveau du micro-ordinateur, pour finalement redescendre à 307 K à 2.5 m.

T4 La température initiale de 285 K augmente légèrement à 287 K à une distance de 0.2 m, demeurant stable à ce niveau jusqu'à 0.6 m. Ensuite, la température augmente jusqu'à 303 K au niveau de la tête de la personne.

T5 : La température passe de 285 K à 287 K sur une distance de 0.2 m, demeurant constante à cette valeur jusqu'au niveau du sol.

IV.2.3.3 Récapitulation des résultats :

Dans ce cas, les conditions initiales sont demeurées similaires au premier scénario, toutefois une sortie a été ajoutée sous le bureau. L'illustration révèle une amélioration substantielle dans la distribution spatiale du champ de vitesse, et une tendance similaire est observée pour le champ de température. Malgré ces modifications, le système demeure inefficace pour garantir un niveau de confort thermique satisfaisant pour l'occupant. Cette observation souligne l'importance des aménagements structurels dans la conception des systèmes de circulation d'air, tout en mettant en évidence la complexité inhérente à l'optimisation du confort environnemental dans des environnements clos.

IV.2.4 Discussion des résultats du quatrième cas :

Dans cette disposition, Les paramètres de vitesse sont dorénavant caractérisés par (V=0.3, α=70.52°), tandis que l'évacuation de l'air demeure immuable, positionnée sous le mur, tel qu'observé précédemment. Parallèlement, l'étude a scruté la diffusion du polluant provenant de la table adjacente. Les figures ci-dessous illustrent l'évolution de la distribution du champ de la température à travers différent intervalles de temps (régime transitoire).

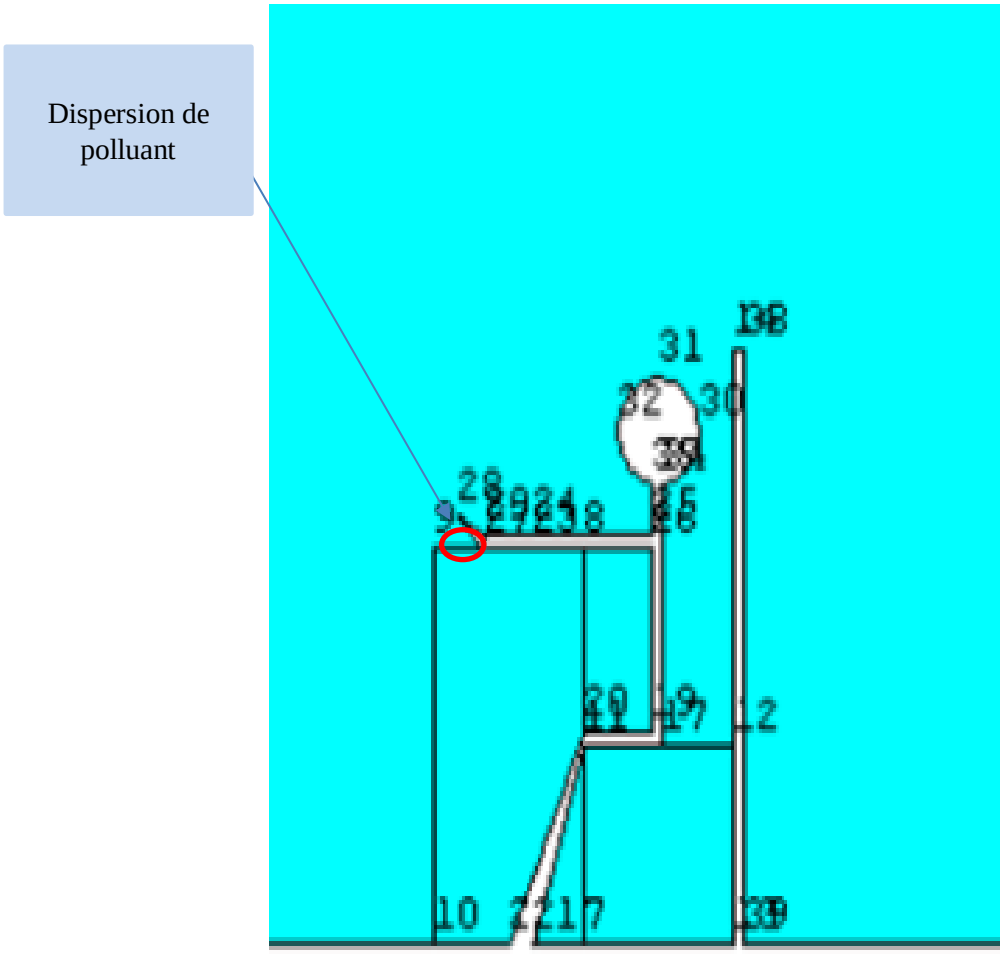


Figure IV.14 : Zone de dispersion de polluant.

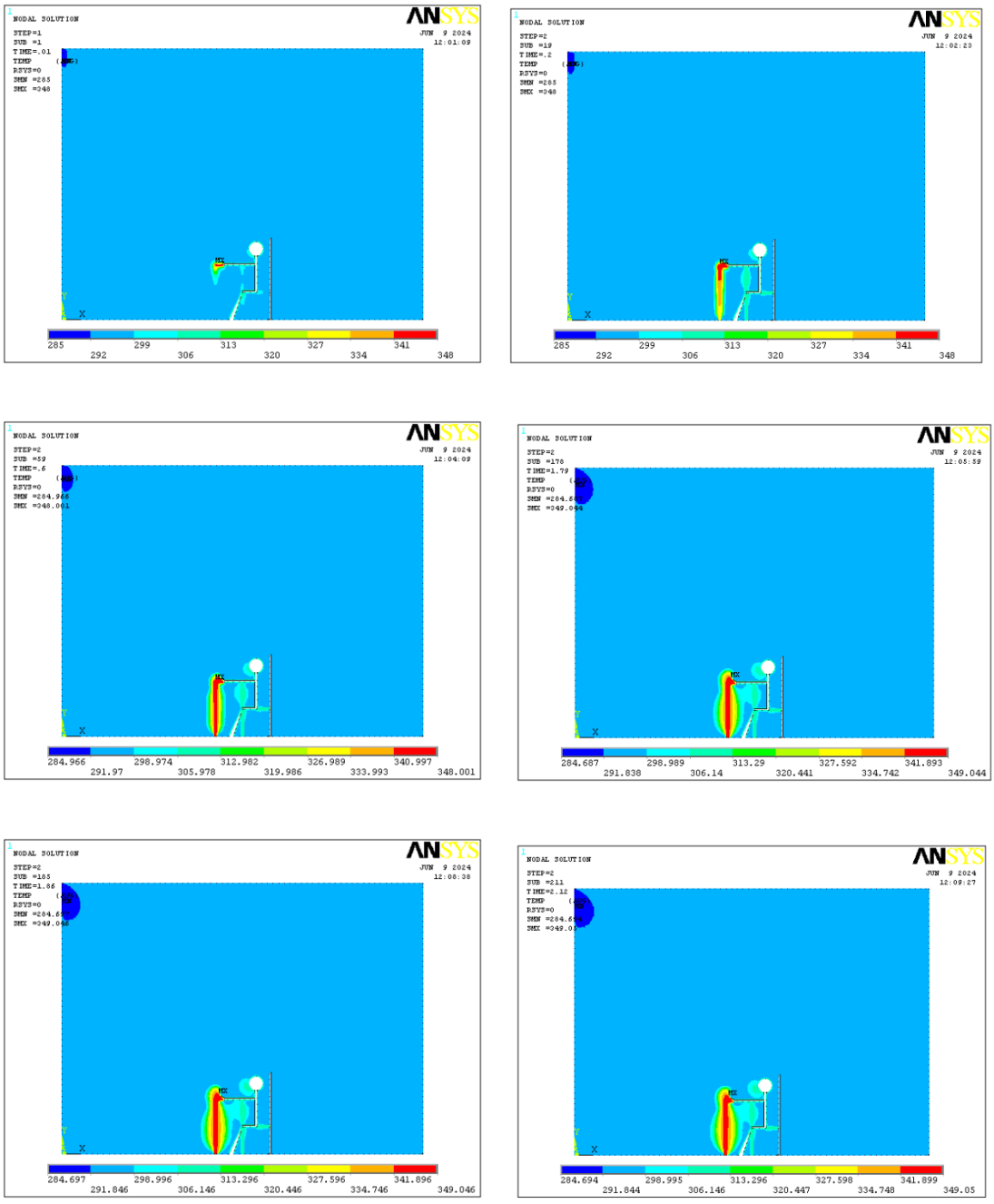


Figure IV.15 : Image séquentielle de la variation de champs de température.

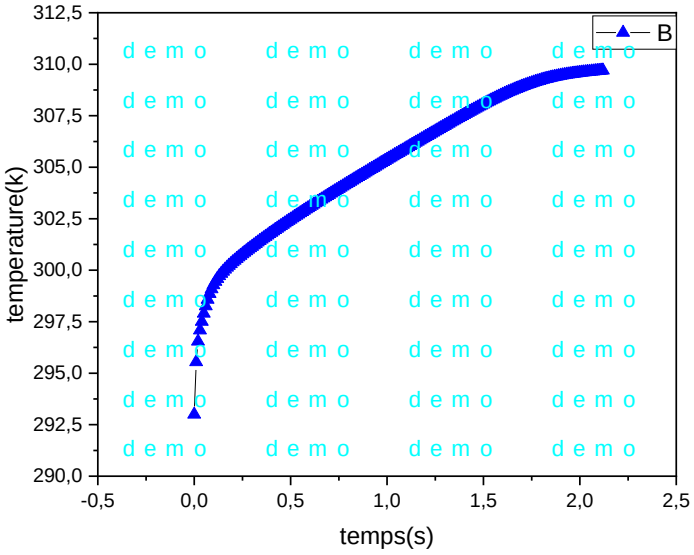


Figure IV.16 : la variation de la température devant la bouche de l'humain en fonction du temps.

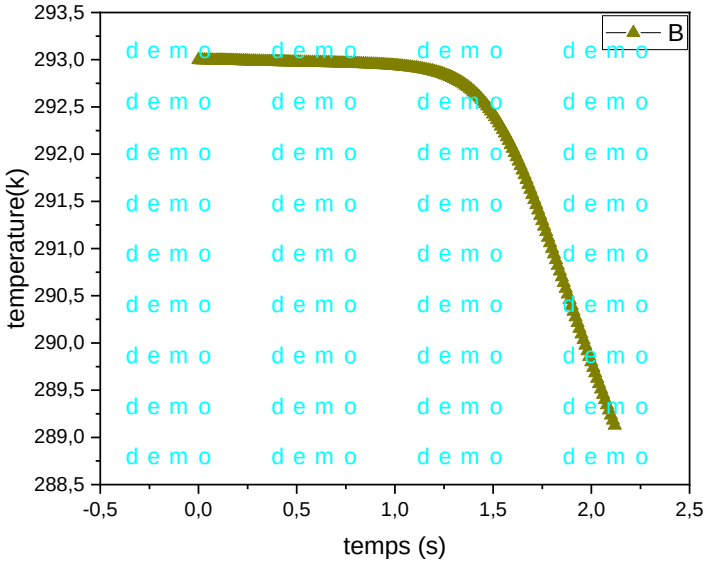


Figure IV.17 : la variation de la température proche de point de soufflage de l'air conditionné en fonction du temps.

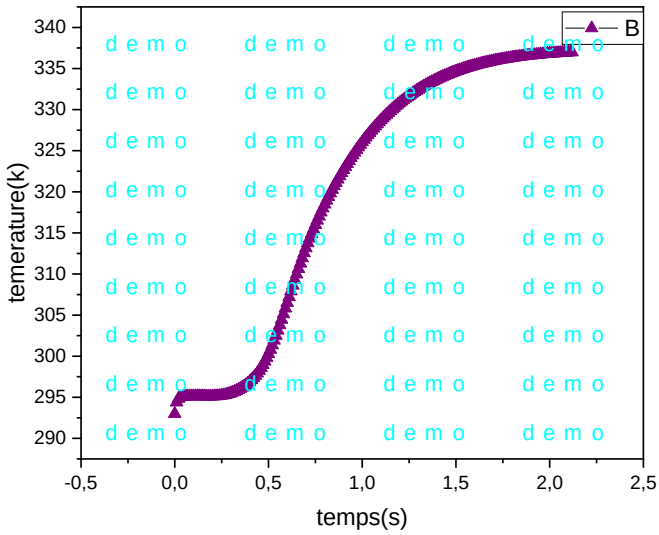


Figure IV.18 : la variation de la température proche de point de dispersion du polluant en fonction du temps.

IV.2.4.1 Récapitulation des résultats :

À partir des résultats obtenus, à travers l'analyse des images séquentielles ainsi que des graphiques, il est observé que les conditions actuelles ne sont pas vraiment satisfaisantes. En effet, la dispersion des polluants se produit à un rythme plus rapide que celui auquel l'air conditionné ne peut contenir ou éliminer le contaminant.

IV.2.5 Discussion des résultats du cinquième cas :

Dans cette disposition, l'évaporateur a été transposé et disposé en orientation horizontale, à gauche du plafond. Les paramètres de vitesse sont dorénavant caractérisés par (-Vy=0.3, Vx=0), tandis que l'évacuation de l'air demeure immuable, positionnée sous le mur, tel qu'observé précédemment. Parallèlement, l'étude a scruté la diffusion du polluant provenant de la table adjacente. Les figures ci-dessous illustrent l'évolution de la distribution du champ de la température à travers diffèrent intervalles de temps (régime transitoire).

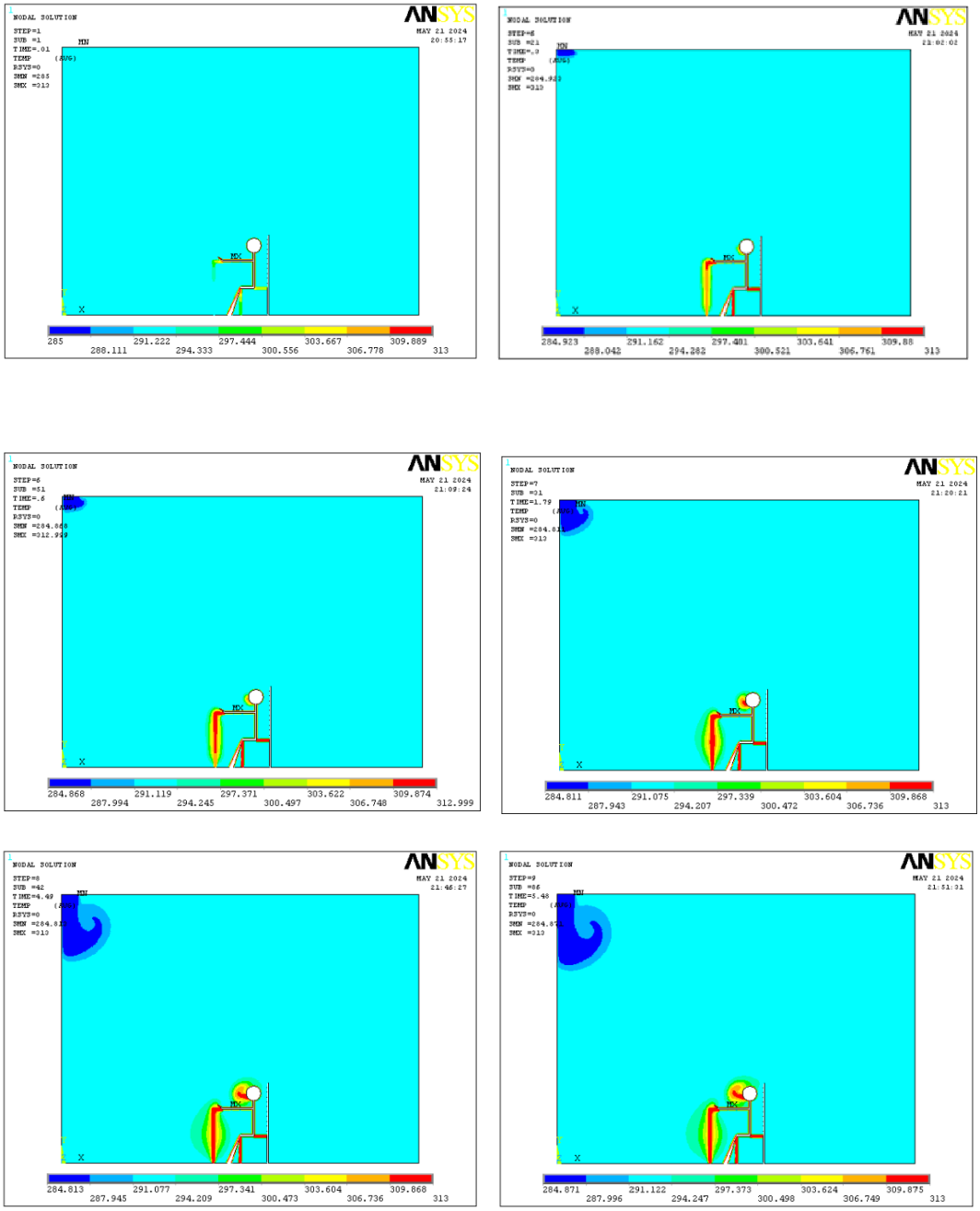


Figure IV.19 : Image séquentielle de la variation de champs de température.

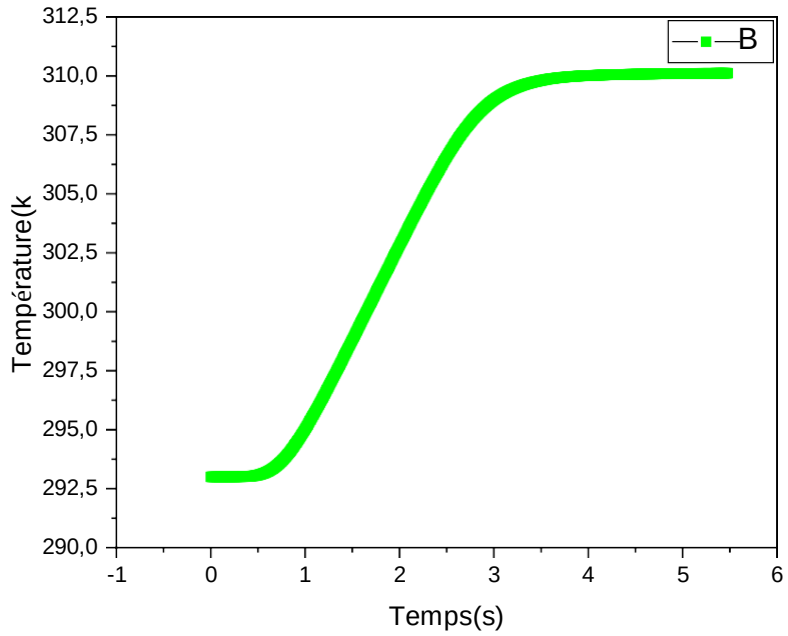


Figure IV.20 : la variation de la température devant la bouche de l'humain en fonction du temps

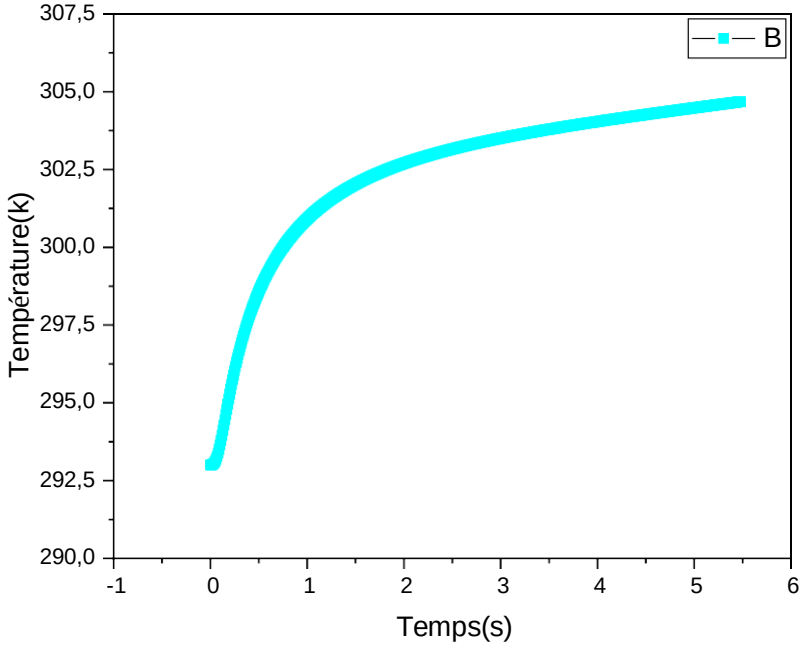


Figure IV.21 : la variation de la température proche de point de dispersion du polluant en fonction du temps

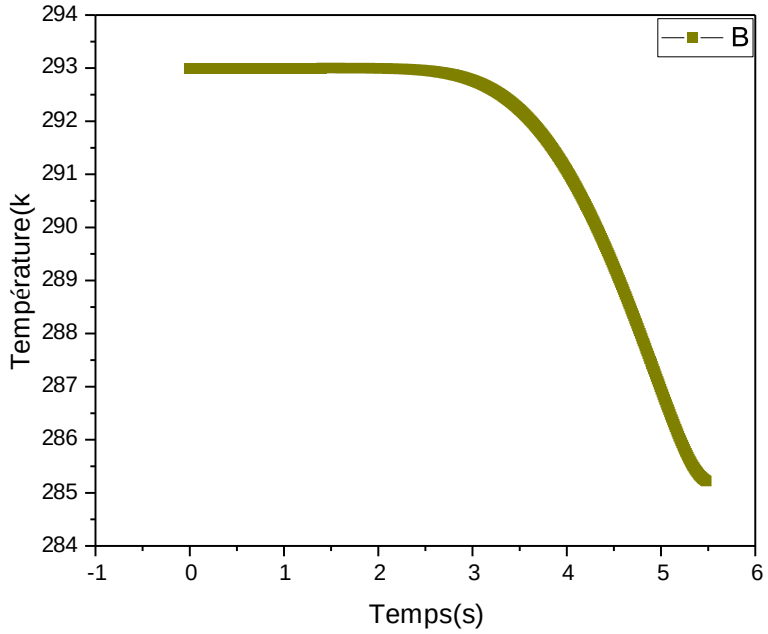


Figure IV.22 : la variation de la température proche de point de soufflage de l'air conditionné en fonction du temps.

IV.2.5.1 Récapitulation des résultats :

À partir des résultats obtenus, à travers l'analyse des images séquentielles ainsi que des graphiques, il est observé que les conditions actuelles ne sont pas satisfaisantes. En effet, la dispersion des polluants se produit à un rythme plus rapide que celui auquel l'air conditionné ne peut contenir ou éliminer le contaminant.

IV.3 Conclusion :

À la lumière des cinq scénarios explorés dans notre étude, chaque modification de paramètre (tel que l'ajout d'une composante à la vitesse de soufflage) ou de stratégie (comme l'introduction de points de sortie supplémentaires ou le changement de l'emplacement des points de soufflage) a engendré une amélioration marginale. Bien que ces améliorations soient modestes, elles incitent à une réflexion approfondie quant à l'impact significatif de chaque paramètre ou stratégie. Il est donc impératif d'étudier individuellement et en profondeur chaque élément afin d'obtenir des résultats précis et réussis.

Conclusion et recommandations

Cette étude démontre l'efficacité de l'outil ANSYS APDL CFD pour modéliser et analyser les écoulements bi phasiques miscibles dans des environnements clos. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes de ventilation ainsi que pour la gestion de la qualité de l'air intérieur dans diverses applications industrielles et résidentielles.

L'objectif principal de cette recherche est de mener une étude numérique de plusieurs stratégies de système de ventilation pour une pièce. Cette étude vise à déterminer les paramètres optimaux pour protéger les occupants et éliminer les sources infectieuses ou, du moins, réduire leur propagation. De plus, l'étude vérifie les gradients de température, les vitesses de l'air et la dispersion des polluants.

Le confort thermique reste une notion subjective qui dépend de l'individu et ne peut être défini de manière rigoureuse. À titre de perspective, certains paramètres seront abordés à l'avenir, notamment par le biais d'études expérimentales et de sondages pour vérifier le degré de satisfaction des occupants dans les unités médicales.

En conclusion, cette recherche met en lumière l'importance des simulations numériques pour optimiser les conditions de ventilation et de qualité de l'air intérieur. L'utilisation d'outils comme ANSYS APDL CFD s'avère essentielle pour développer des environnements sains et confortables, tant dans les secteurs industriels que résidentiels.

Les futures études expérimentales et les enquêtes de satisfaction des occupants permettront de renforcer et de valider les résultats obtenus, assurant ainsi une amélioration continue des systèmes de ventilation et du confort thermique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] https://www.armstrongceilings.com/commercial/fr-ca/performance/indoor-

[2] le confort thermique comme, cet état d'esprit qui exprime la satisfaction envers l'environnement thermique» (https://dam-oclc.bac-lac.gc.ca)

[3] Littoral de l'île de la Réunion 2018-2019. enviroBAT-Réunion ;

[4] Évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température de consigne des Thermostats en mode chauffage à l'aide de données mesurées in situ et de simulations par Paméla NOËLMONTRÉAL, LE 28 MAI 2018 ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC ;

[5] JOHNSON CONTROLS – HITACHI AIR CONDITIONING COMPANY .https:/www.hitachiclimat.fr/actualites/confort-thermique-age ;

[6] https:/www.materiaux-naturels.fr/dossier/87-confort-thermique ;

[7] https://www.chauffage-et-climatisation.fr/guide-achat/comment-ne-pas- consommer-avec-une-clim-reversible/Correspondances de textede chaleur en hiver et des gains de chaleur indésirables ;

[8]https://www.lesmateriaux.fr/blog/isolation/chaleur-cosy-et-fraicheur-estivale-les-secrets-d-une-isolation-efficace.htmlCorrespondances de texte de matériaux à forte inertie thermique ;

[9] : https://safetyculture.com/fr/themes/systemes-cvc/ ;

[10] BOULFANI, Warda (2010) - Les Ambiances Thermiques d'été dans l'habitat de la période coloniale a patio (Chapitre 2 « Ambiance et confort thermique»), Masters thesis, Université Mohamed Khider – Biskra ;

[11] Gail Brager, Hui Zhang & Edward Arens (2015) Evolving opportunities for providing thermal comfort, Building Research & Information, 43:3, 274-287, DOI: 10.1080/09613218.2015.993536 ;

[12] Anna Bogdan (2011) Case Study Assessment of Local and General Thermal Comfort by Means of Local Skin Temperature, International Journal of Ventilation, 10:3, 291-300, DOI: 10.1080/14733315.2011.11683956 ;

[13] Anna Bogdan (2011) Case Study Assessment of Local and General Thermal Comfort by Means of Local Skin Temperature, International Journal of Ventilation, 10:3, 291-300, DOI: 10.1080/14733315.2011.11683956 ;

[14] Énergies par Victor CANDAS Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés ;

[15] Site internet lien de page web : http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/co/exercice1_1.html ;

[16] Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press ;

[17] Developpement d'un modele zonal pour la simulation thermo-aeraulique des batiments multizones https://www.researchgate.net/figure/Lindice-PPD-en-fonction-du-PMV-ANSI-ASHRAE-Standard-55-2004_fig5_252768765 ;

[18] Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press ;

[19] Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) Étude CFD du système de ventilation d'une chambre d'hôpital pour réduire les infections et atteindre le confort thermique Mustafa Alkhalaf, Novembre 2022 ;

[20] https://www.condair.com/fr/Humidification-dans-les-ecoles ;

[21] https://guidebatimentdurable.brussels/humidification-deshumidification;

[22] https://www.guidebatimentdurable.brussels/humidification-deshumidification ;

[23] Source Raoust, M. (Terao), et al www.asso-iceb.org ;

[24] Tome I NOTIONS DE BASE (technique de chauffage structure et fonctions d'installation) préparé par Salvatore Morreale 7/9/2001 ;

[25] Mémoire présenté en vue de l'obtention Du diplôme de Magister : intérieur optimale dans tous les types de bâtiments commerciaux. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUESET DU CONFORT THERMIQUE DANS L'HABITAT : Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida ;

[26] Etude CFD du système de ventilation d'une chambre d'hôpital pour réduire les infections et atteindre le confort thermique, Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) PAR© Mustafa Alkhalaf ;

[27]https://courses.ansys.com/index.php/courses/intro-to-ansys-mechanical-apdl-scripting/lessons/solid-modeling-meshing-lesson-3/ ;

[28]https://courses.ansys.com/index.php/courses/intro-to-ansys-mechanical-apdl-scripting/lessons/solid-modeling-meshing-lesson-3/ ;

[29]https://courses.ansys.com/index.php/courses/intro-to-ansys-mechanical-apdl-scripting/lessons/solid-modeling-meshing-lesson-3/ ;

[30] Vulgarisation des aspects mathématiques et illustration de la méthode. Méthode des éléments finis, Vincent Manet .