

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : génie mécanique

Spécialité : énergie renouvelable en mécanique

Par : Talbi Abdeladhim et Benkelfat Lyes

ETUDE ET SIMULATION DE LA VENTILATION NATURELLE DANS UNE MAISON BIOCLIMATIQUE

Soutenu publiquement, le 17 / 06/ 2025 , devant le jury composé de :

Mr Rostane Brahim	Grade Pr	Université de Tlemcen	Président
Mr Yousfi Sidi Mohamed	Grade MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mme OURRAD Soumia	Grade MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
Mr Benmensour Abdelkrime	Grade MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024/2025



DÉDICACES

*Nous dédions ce modeste travail à
ceux qui ont été les piliers de notre réussite, les sources
de notre motivation et les témoins silencieux de nos
efforts.*

*À nos parents, pour leur amour inestimable, leurs
sacrifices quotidiens, leur patience et leur soutien
indéfectible. Ce travail est avant tout le fruit de leur
dévouement.*

*À nos familles, pour leur présence réconfortante, leurs
encouragements constants et leur foi en nos capacités,
même dans les moments de doute.*

*À nos amis, compagnons de route et de cœur, pour leurs
encouragements, leur entraide et les instants de partage
qui ont allégé le poids du travail.*

*À nos enseignants, pour la richesse de leur savoir, la
qualité de leur encadrement, et la passion qu'ils ont su
transmettre au fil des années. Leur engagement à nos
côtés a grandement nourri notre parcours et donné du
sens à ce projet.*

*Et enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin,
ont contribué à l'aboutissement de ce travail avec
bienveillance et générosité.*

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent à nos deux encadrants, **Mme OUERRAD SOUMIA** et **Mr ABDELKRIME BENMENSOUR**, pour leur disponibilité, leurs conseils éclairés, leur rigueur scientifique et leur accompagnement constant.*

Leur soutien, leur confiance et leur bienveillance ont grandement facilité l'avancement de ce travail et enrichi notre réflexion.

*Nous tenons également à remercier l'ensemble du corps enseignant et administratif de **faculté des sciences et technologie Tlemcen** pour la qualité de la formation dispensée tout au long de notre parcours.*

Nos pensées les plus reconnaissantes vont à nos familles et à nos parents, pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien indéfectible.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos amis et collègues, pour leur présence, leur entraide, et les moments de complicité qui ont marqué cette belle aventure universitaire. À tous, nous adressons nos remerciements les plus respectueux et les plus sincères.

Sommaire

Dédicace -----	I
Remercîments -----	II
Sommaire-----	III
Liste des tableaux-----	VI
Lliste de figure-----	VIII
Nomenclature -----	IX
 Résumé-----	 X
Les mots clés -----	XI
ملخص -----	XII
Abstract -----	XIII
Introduction Générale	1

Chapitre I :recherche bibliographique

I. Introduction	4
Maison bioclimatique	4
1 1. Définition	4
2. Construction d'une maison bioclimatique	5
1. Avantages et inconvénients du bâtiment bioclimatique	6
II. Le vent	7
1. Les types de vent	8
2. Les brises de terre et de mer :	8
III. La ventilation naturelle :	10
1. Définition	10
2. Objectif de la ventilation :	10
3. Le mécanisme de la ventilation naturelle :	11
2. Les stratégies de la ventilation naturelle :	12
A. Ventilation à simple exposition :	12
B. Ventilation transversale :	12

C. Ventilation naturelle par tirage thermique :	13
D. Effets combinés du tirage thermique et du vent :	14
E. Ventilation naturelle par équilibrage de conduits :	15
4. Différentes cavités utilisées en ventilation naturelle	16
A. Le mur trombe :	17
B. La cheminée solaire :	17
C. La façade à double peau :	18
D. Les écopés :	18
E. Les tours à vent :	18
F. Les dômes :	19

Chapitre II: Analyse climatique et bioclimatique

Introduction :	21
I. Pourquoi le confort ?	21
1. Définition	21
2. Le confort respiratoire	21
3. Le confort thermique	22
4. Le confort pour la santé	22
II. ANALYSE CLIMATIQUE DE LA REGION DE TLEMCCEN	22
1. Localisation :	22
2. Les limites :	23
3. La Température de l'air	23
4. Humidité relative :	24
5. Le vent :	25
6. Précipitation :	26
7. Ensoleillement	28
III. Analyse Bioclimatique de la région de Tlemcen	30
A. Synthèse des tableaux de Mahoney	30
B. Diagramme de Givoni :	32
C. Synthèse de l'analyse bioclimatique :	33
Conclusion :	34

Chapitre III: modilisation

I.	Introduction	37
II.	Généralités sur la CFD	37
III.	Modèle mathématique	37
1.	Équation de continuité (Conservation de la masse)	38
2.	Équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes)	38
3.	Équation de l'énergie	39
4.	Modélisation de la turbulence – Modèle	39
IV.	Hypothèses de modélisation	42
V.	Conclusion	42

Chapitre IV: Simulation Et Résultat

I.	Logiciel de simulation GAMBIT	45
1.	Maillage sous Gambit	45
A.	Démarrage de Gambit	45
B.	Construction de la géométrie	45
C.	Maillage	46
2.	Logiciel de simulation FLUENT	50
A.	Présentation de Fluent	50
B.	Interface du code Fluent	51
C.	Choix des paramètres de FLUENT	52
D.	Choix des matériaux	52
E.	Schémas de discrétisation	53
F.	Choix du schéma d'interpolation de la pression	53
G.	Conditions aux limites	54
H.	Procédure de résolution	55
I.	Contrôle de la solution (convergence)	55
J.	ETUDE DE CAS	56
	Conclusion Générale	94
	Références et bibliographie	96

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE 2

Tableau 1 : la direction du vent annuelle à Tlemcen-----	26
Tableau 2 : Données climatiques mensuelles -----	31
Tableau 3 : Interprétation Bioclimatique (codes Mahoney) -----	32

CHAPITRE 4

Tableau 4 : les paramètres de solveur (conditions aux limites) -----	53
Tableau 5 : les valeurs des différentes variables de sous relaxation -----	54
Tableau 6 : les différents modèles utilisés sous solveur fluent -----	54
Tableau 7 : Les résidus pour les différentes équations -----	55
Tableau 8 : Tableau des cas -----	55

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure 1.1. Maison bioclimatique -----	6
Figure 1.2. Brises de terre et de mer. -----	9
Figure 1.3. Brise de mer. -----	10
Figure 1.4. Brise de terre. -----	11
Figure 1.5. Ventilation à simple exposition due au vent. -----	13
Figure 1.6. Ventilation Transversale. -----	14
Figure 1.7. Ventilation naturelle par tirage thermique. -----	15
Figure 1.8. Effets combinés du vent et du tirage thermique. -----	16
Figure 1.9. Ventilation par conduits a tirage-naturel détails des types de conduits de haut en bas. -----	17
Figure 1.10. Diagramme schématique de trois types de cavité pour le chauffage passif et la ventilation naturelle. -----	18

CHAPITRE 2

Figure 2.1. La température de l'Aire extérieur dans la région de Tlemcen. -----	24
Figure 2.2. Humidité relative sur la région de Tlemcen 2024. -----	25
Figure 2.3. La variation de la vitesse du vent sur le site de Tlemcen. -----	27
Figure 2.4. Variation de la précipitation sur le site de Tlemcen. -----	28

Figure 2.5. Ensoleillement de la région de Tlemcen. -----29

Figure 2.6. Diagramme Psychométrique d'après B.GIVONI appliqué à la région de Tlemcen.-----33

CHAPITRE 4

Figure 4.1. "Processus CFD" pour la simulation numérique pour Gambit-Fluent. -----46

Figure 4.2. Type des maillages. -----48

Figure 4.3. Schéma générale qui représente la position du Fluent dans les étapes de calcul numérique. -----51

Nomenclature

Symboles	Grandeurs	Unités
μ	viscosité dynamique	[Kg/m.s]
ρ	densité	[Kg/m ³]
c_p	Capacité calorifique	[J/Kg.K]
g_i	Gravité	[m/s ²]
K	conductivité thermique	[W/m.k]
S_T	Source thermique	[W/m ³]
T	température	[K]
P	pression	[pas]
U	la vitesse	[m/s]
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique	[m ² /s ³]

Résumé

Ce mémoire de fin d'études porte sur l'étude et la simulation de la ventilation naturelle dans une maison bioclimatique située dans la région de Tlemcen. Dans un contexte marqué par la nécessité de réduire la consommation énergétique des bâtiments, la ventilation naturelle s'impose comme une solution passive et durable, favorisant le confort thermique tout en limitant le recours aux systèmes mécaniques de climatisation.

Le travail s'articule autour de quatre axes principaux. Le premier chapitre présente une revue bibliographique détaillée sur les fondements de l'architecture bioclimatique, les mécanismes de la ventilation naturelle et les différents dispositifs architecturaux favorisant les échanges thermiques naturels. Le second chapitre est consacré à l'analyse climatique et bioclimatique de la région d'étude, à travers les paramètres clés tels que la température, l'humidité, le vent, les précipitations et l'ensoleillement. L'objectif est d'identifier les stratégies bioclimatiques les mieux adaptées au contexte local.

Dans le troisième chapitre, une modélisation numérique des phénomènes d'écoulement d'air est mise en œuvre à l'aide de la dynamique des fluides numérique (CFD) via les logiciels Gambit et Fluent. Les équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) ainsi qu'un modèle de turbulence k- ϵ sont utilisés pour simuler les écoulements d'air dans différentes configurations architecturales.

Enfin, le dernier chapitre présente les résultats de onze cas de simulation, différenciés par la forme du toit, la position des ouvertures, et la présence d'éléments tels que cheminées ou coupoles. Les analyses montrent que la performance de la ventilation naturelle dépend fortement du positionnement des ouvertures, de la stratification thermique et du tirage naturel. Le cas 11, intégrant une cheminée et un toit incliné, s'est révélé le plus performant, tandis que le cas 1, sans sortie d'air, présente les moins bons résultats.

Ce travail met en lumière l'intérêt majeur de la ventilation naturelle dans la conception bioclimatique et démontre l'apport des outils de simulation numérique pour optimiser le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les mots clés :

Ventilation naturelle Architecture bioclimatique, Confort thermique ,CFD
(Computational Fluid Dynamics) ,Tirage naturel .

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة ومحاكاة التهوية الطبيعية في منزل بيئي يقع في منطقة تلمسان. وفي ظل الحاجة المتزايدة إلى تقليل استهلاك الطاقة في المباني، تبرز التهوية الطبيعية كحل سلبي ومستدام وفعال، يعزز الراحة الحرارية ويقلل من الاعتماد على أنظمة التكييف الميكانيكية.

ينقسم هذا العمل إلى أربعة محاور رئيسية. يتناول الفصل الأول مراجعة نظرية شاملة لأسس العمارة البيئية، ومبادئ التهوية الطبيعية، والعناصر المعمارية التي تسهل التبادل الحراري الطبيعي. أما الفصل الثاني، فيُخصص لتحليل المناخ والخصائص البيوكليماوية لمنطقة الدراسة، من خلال دراسة المعطيات المناخية الأساسية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، سرعة واتجاه الرياح، التساقطات، والإشعاع الشمسي، بهدف تحديد الاستراتيجيات البيئية الأنسب للسياق المحلي

الفصل الثالث يعرض نمذجة رقمية لظواهر تدفق الهواء باستخدام الديناميكا الرقمية للموائع (CFD) عبر برنامجي Gambit- Fluent حيث تم استعمال معادلات الحفظ (الكتلة، الطاقة، و كمية الحركة) الى جانب نموذج الاضطراب من نوع $k-\epsilon$ لمحاكاة حركة الهواء في عدة تكوينات معمارية

أما الفصل الرابع، فيعرض نتائج أحد عشر حالة محاكاة، تختلف من حيث شكل السقف، وموضع الفتحات، ووجود عناصر معمارية مثل المداخل أو القباب. وتُظهر التحاليل أن فعالية التهوية الطبيعية تعتمد بشكل كبير على مواضع الفتحات، والتدرج الحراري، وقوة السحب الحراري. وقد أثبتت الحالة رقم 11، التي تجمع بين مدخنة وسقف مائل، أنها الأكثر كفاءة، في حين أظهرت الحالة رقم 1، التي تنفجر إلى منفذ هواء، أضعف النتائج.

يسلط هذا العمل الضوء على الأهمية الكبيرة للتهوية الطبيعية في التصميم البيوكليماوي، ويبرهن على فاعلية أدوات المحاكاة الرقمية في تحسين الراحة الحرارية وكفاءة الطاقة في المباني.

الكلمات المفتاحية :

الديناميكا الرقمية للموائع (CFD)، التهوية الطبيعية، العمارة البيئية، الراحة الحرارية، السحب الحراري الطبيعي

Abstract

This graduation thesis focuses on the study and simulation of natural ventilation in a bioclimatic house located in the Tlemcen region. In a context where reducing the energy consumption of buildings has become a priority, natural ventilation stands out as a passive, sustainable, and effective solution, enhancing thermal comfort while minimizing reliance on mechanical air conditioning systems.

The work is structured around four main axes. The first chapter presents a detailed literature review on the principles of bioclimatic architecture, the mechanisms of natural ventilation, and various architectural elements that promote natural thermal exchanges. The second chapter is dedicated to the climatic and bioclimatic analysis of the study area, based on key parameters such as temperature, humidity, wind, precipitation, and solar radiation, with the aim of identifying the most suitable bioclimatic strategies for the local context.

In the third chapter, numerical modeling of airflow phenomena is carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) via the software tools Gambit and Fluent. The conservation equations (mass, momentum, and energy), along with a $k-\epsilon$ turbulence model, are employed to simulate airflow within different architectural configurations.

Finally, the last chapter presents the results of eleven simulation cases, which vary according to roof shape, opening positions, and the presence of architectural features such as chimneys or domes. The analyses show that the performance of natural ventilation largely depends on the positioning of openings, thermal stratification, and the stack effect. Case 11, which includes a chimney and a sloped roof, proved to be the most efficient, while case 1, which lacks an air outlet, showed the poorest results.

This study highlights the crucial role of natural ventilation in bioclimatic design and demonstrates the value of numerical simulation tools in optimizing both thermal comfort and energy efficiency in buildings.

Keywords:

Natural ventilation, Bioclimatic architecture, Thermal comfort, CFD (Computational Fluid Dynamics), Stack effect.



Introduction Générale

Introduction Générale

La recherche de solutions durables et économes en énergie dans le secteur du bâtiment est devenue un enjeu majeur face aux défis environnementaux et climatiques actuels. L'architecture bioclimatique s'inscrit dans cette dynamique en tirant parti des conditions climatiques locales pour concevoir des bâtiments confortables, performants et respectueux de l'environnement. Dans ce contexte, la ventilation naturelle représente une stratégie passive efficace permettant de renouveler l'air intérieur, d'améliorer le confort thermique et de réduire la consommation énergétique liée à la climatisation.

Le présent mémoire de fin d'études s'intéresse à l'étude de la ventilation naturelle dans une maison bioclimatique à travers une approche théorique, climatique et numérique. Après une revue bibliographique sur les concepts fondamentaux de l'architecture bioclimatique et des dispositifs de ventilation passive, une analyse climatique et bioclimatique de la région de Tlemcen est réalisée afin de dégager les stratégies les mieux adaptées au contexte local. La modélisation numérique par CFD (Computational Fluid Dynamics), à l'aide des logiciels Gambit et Fluent, permet ensuite de simuler différentes configurations de ventilation naturelle pour évaluer leur efficacité.

Ce travail vise ainsi à identifier, à travers la simulation et l'analyse, les solutions architecturales optimales pour améliorer les performances thermiques d'une maison bioclimatique dans un climat semi-aride, en mettant l'accent sur le rôle déterminant de la ventilation naturelle.

- **Objectif de travail**

- Analyser les conditions climatiques et bioclimatiques de la région de Tlemcen (température, humidité, vent, précipitations, ensoleillement), pour identifier les stratégies adaptées au climat local.
- Mettre en œuvre une modélisation numérique CFD (dynamique des fluides) à l'aide des logiciels Gambit et Fluent, afin de simuler les écoulements d'air et les transferts thermiques dans différentes configurations architecturales.
- Évaluer et comparer les performances de 11 cas de simulation, en faisant varier la forme du toit, la position des ouvertures, et la présence ou non de dispositifs de ventilation naturelle (coupole, cheminée, etc.).

- Identifier les configurations les plus efficaces en termes de ventilation naturelle, et en tirer des recommandations pratiques pour la conception bioclimatique des maisons dans les régions semi-arides.

.

Chapitre I :

Recherche Bibliographique

I. Introduction :

Le présent chapitre vise à établir une base théorique solide autour des notions fondamentales liées à la maison bioclimatique et aux phénomènes physiques qui influencent la ventilation naturelle. À travers une revue bibliographique approfondie, nous explorons les principes de conception bioclimatique, les effets du vent, les mécanismes de la ventilation naturelle et les différentes stratégies architecturales permettant d'exploiter les conditions climatiques au service du confort thermique.

La recherche bibliographique constitue une étape essentielle dans la compréhension des solutions passives de ventilation. Elle permet de mettre en évidence les interactions entre l'environnement extérieur (vent, ensoleillement, topographie) et la structure architecturale (orientation, matériaux, ouvertures), tout en soulignant l'importance d'un dimensionnement adéquat des éléments de construction pour une performance énergétique optimale.

Les différents dispositifs traditionnels et contemporains de ventilation naturelle — tels que les cheminées solaires, les murs Trombe, les façades double peau, les tours à vent ou les coupoles — sont abordés dans ce chapitre. L'analyse des avantages, des limites et des conditions d'utilisation de chacun de ces systèmes permet d'alimenter la réflexion qui guidera le choix des configurations étudiées dans les chapitres suivants.

Maison bioclimatique

1 1. Définition :

Les principes de l'architecture bioclimatique étaient déjà utilisés dans l'Antiquité, lorsque les systèmes de chauffage étaient limités ou inexistants. Une simple comparaison entre la conception des maisons des pays chauds et celles des pays froids suffit à convaincre l'observateur de la validité de l'argument.

La réglementation thermique 2012 a entraîné un regain d'intérêt pour le concept de maison bioclimatique. Dans le contexte contemporain, les architectes intègrent de plus en plus les spécificités du lieu dans leur processus de conception. Cette approche vise à optimiser l'exploitation des ressources naturelles, telles que la lumière du soleil, pendant les mois d'hiver, tout en atténuant les effets de la chaleur estivale.

La conception des maisons bioclimatiques repose sur quelques règles de base en matière :

- De choix du lieu d'implantation,
- D'orientation des façades,
- De technique de construction et choix des matériaux.

En résumé, un logement conçu selon les principes bioclimatiques est plus durable sur le plan environnemental. Le constructeur met en œuvre des stratégies pour optimiser l'utilisation des ressources naturelles (par exemple le soleil et le bois) dans le but d'améliorer la performance énergétique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

2. Construction d'une maison bioclimatique :

Les bâtiments bioclimatiques doivent répondre à certaines normes :

- A. Environnement : La topographie du terrain est un atout indéniable pour optimiser la performance énergétique de la maison bioclimatique. L'inclinaison naturelle du terrain optimise l'angle d'ensoleillement tout en offrant une protection contre le vent. On peut donc conclure que le choix du terrain est d'une importance capitale et que cette méthodologie n'est pas universellement applicable. La végétalisation de la parcelle constitue un atout, pour protéger des vents dominants en hiver et apporter de la fraîcheur en été.
- B. L'orientation de la maison bioclimatique et l'agencement des pièces : L'agencement du bâtiment doit être conçu de manière à ce que les espaces de vie soient orientés vers le sud, les pièces ne nécessitant pas d'ensoleillement étant situées sur la façade nord. Outre le garage et la réserve, les placards, les escaliers, les entrées et les autres zones désignées comme espaces tampons peuvent être situés au nord. La salle d'eau peut aussi être orientée Nord, tandis que les chambres sont placées à l'Est et à l'Ouest.
- C. Choix des matériaux et des couleurs : La conception de bâtiments bioclimatiques implique l'utilisation de matériaux biosourcés, le bois, le chanvre et la terre cuite étant particulièrement adaptés. En outre, il a été démontré que ces matériaux de construction offraient des performances énergétiques supérieures. En outre, il a été démontré que ces matériaux de construction offraient des performances énergétiques supérieures. Il a été démontré que certains revêtements ont la capacité d'empêcher la surchauffe pendant les mois d'été. Pendant la journée, ces organismes absorbent l'énergie thermique du soleil, qui est ensuite restituée pendant les périodes nocturnes, lorsque les températures ambiantes diminuent. Les couleurs ocres sont recommandées pour les murs dans les zones couvertes,

car elles présentent des propriétés supérieures d'absorption de la chaleur lorsqu'elles sont exposées au soleil.

- D. Emplacement et taille des ouvrants / fenêtre de toit : Il est recommandé d'orienter les fenêtres principalement vers le sud/sud-est et le sud/sud-ouest. Il est impératif d'éviter, dans la mesure du possible, les ouvertures orientées vers le nord. A l'inverse, le sud est l'emplacement idéal pour les grandes baies vitrées qui laissent entrer le soleil en hiver.
- E. Isolation thermique renforcée / Ventilation efficace : L'étanchéité à l'air d'un bâtiment est d'une importance capitale pour éviter les pertes de chaleur pendant les mois d'hiver, réduire ainsi la sensation de froid et améliorer le confort thermique de ses occupants. Pour atteindre cet objectif, il est impératif de renforcer l'isolation et d'éviter les ponts thermiques. La ventilation double flux s'est révélée être un complément efficace de l'installation, améliorant la qualité de l'air. Il est impératif d'utiliser tous les moyens de ventilation naturelle pendant les mois d'été, y compris le puits canadien.
- F. Protection solaire : L'installation de débords de toit est une solution efficace pour obtenir un confort d'été optimal en offrant une protection efficace contre les rayons du soleil. Il a été déterminé que cette protection ne compromet pas le confort d'hiver, étant donné que l'angle solaire est considérablement plus faible qu'en été. Il a été démontré que la présence de végétation, l'utilisation de films solaires et l'installation de stores peuvent constituer des mesures efficaces de protection contre le soleil.[1]

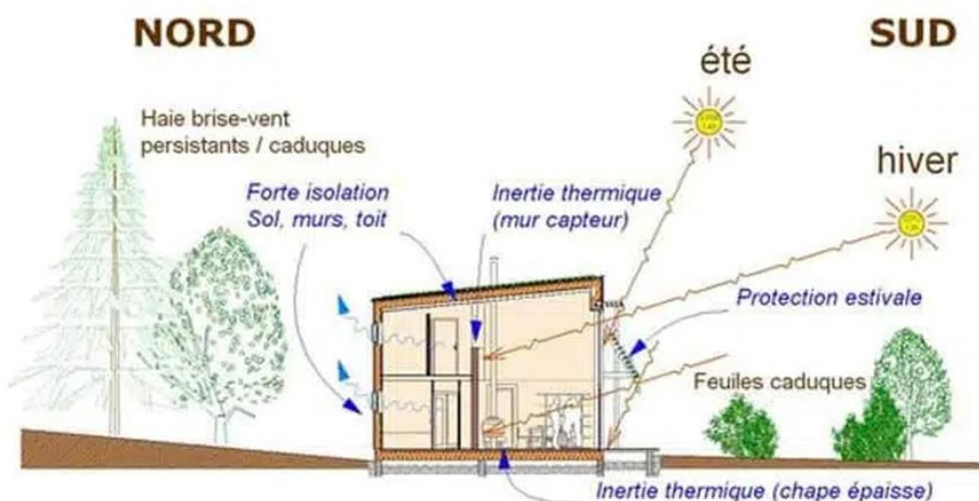


Figure1.1. Maison bioclimatique [2]

1. Avantages et inconvénients du bâtiment bioclimatique :

A. Avantage :

- Il est évident que l'impact sur l'environnement a été réduit grâce à la diminution de la consommation d'énergie. Une maison bioclimatique est un paradigme de l'architecture résidentielle qui respecte à la fois l'environnement naturel et les conditions climatiques dominantes.
- Il a été démontré que ce type de maison offre un confort thermique optimal tout au long de l'année, ce qui permet de réaliser d'importantes économies d'énergie (en termes de chauffage en hiver et de refroidissement en été) par rapport à la consommation d'une maison traditionnelle.
- Ces maisons écologiques se sont révélées très agréables à vivre, avec beaucoup de lumière naturelle et de grandes fenêtres stratégiquement positionnées et orientées pour maximiser la lumière naturelle tout en minimisant le besoin d'éclairage artificiel.

B. Inconvénients :

- La conception de maisons bioclimatiques est un processus hautement technique, qui nécessite l'expertise de professionnels dans ce domaine pour garantir un résultat satisfaisant.
- Bien que les coûts de construction puissent dépasser ceux d'une maison conventionnelle, l'objectif est de garantir des économies financières à long terme.
- La conception structurelle de la propriété, avec son volume compact, offre une marge de manœuvre réduite en ce qui concerne le plan d'étage par rapport à une maison conventionnelle. Le principe fondamental d'une maison bioclimatique repose sur sa capacité à s'adapter à son environnement, plutôt que sur l'approche conventionnelle selon laquelle l'environnement s'adapte à la maison.[3]

II. Le vent :

Le phénomène en question est un mouvement horizontal de l'air généré par les différences de pression entre les masses d'air. L'air s'écoule des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions). Le flux n'est pas rectiligne, mais prend la forme d'un « S » en raison de la force de Coriolis.

La structure du vent est telle qu'à des altitudes inférieures à 3 000 mètres, les forces de frottement contre la surface de la Terre ralentissent le mouvement de l'air, provoquant ainsi des turbulences dans les courants d'air, qui s'entrechoquent à leur tour [4]. Pour caractériser correctement le mouvement du vent, il est nécessaire de mesurer sa vitesse et sa direction.

1. Les types de vent :

Il est généralement admis qu'il existe trois grandes catégories de vent : les vents dominants, les vents saisonniers et les vents locaux.[5]

- Vents dominants : Les vents dominants sont définis comme des phénomènes observables sur plusieurs centaines de kilomètres et fluctuant sur des périodes de l'ordre de la journée. Il est largement admis que les vents dominants sont des phénomènes climatiques à grande échelle.
- Vents saisonniers : Les vents saisonniers sont définis comme ceux qui soufflent à une certaine période de l'année. Les masses d'air au-dessus des continents sont connues pour être plus chaudes pendant les mois d'été et plus froides pendant les mois d'hiver que les masses d'air au-dessus des océans voisins. Pendant les mois d'été, les continents agissent comme des zones de basse pression, les vents provenant des océans plus froids. Il est évident que pendant les mois d'été, les continents passent à un état de basse pression, les vents provenant des océans plus froids. Inversement, pendant les mois d'hiver, les continents passent à un état de haute pression, les vents étant dirigés vers les océans plus chauds.
- Vents locaux : Il a été établi que certains types de vent peuvent être produits par des caractéristiques géographiques locales. Le phénomène des vents locaux se définit par leur capacité à souffler sur de petites zones, conséquence des caractéristiques géographiques spécifiques de la région dans laquelle ils se trouvent. Il s'agit par exemple des vents qui se produisent dans l'environnement terre/mer ou dans l'environnement montagne/vallée.

2. Les brises de terre et de mer :

Ils sont définis comme des vents locaux qui se produisent à proximité des côtes. Ces vents sont générés par la différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer. La capacité thermique plus faible du sol, comme le sable, par rapport à l'eau, entraîne la dissipation de la chaleur de la surface terrestre, ce qui conduit à la formation de ces vents. En outre, la surface de l'eau n'est pas statique ; elle est en mouvement constant, l'eau chaude étant transportée vers des niveaux plus profonds par le processus de mélange. En résumé, le sol se réchauffe beaucoup plus vite que la mer car cette dernière peut absorber une grande quantité d'énergie solaire avant de se réchauffer. Cela est dû au fait que la surface de l'eau n'est pas immobile et qu'il y a un transport de l'eau chaude vers les profondeurs par le biais du mélange.

En outre, le sol, comme le sable, a une capacité thermique beaucoup plus faible que la mer.
[6]

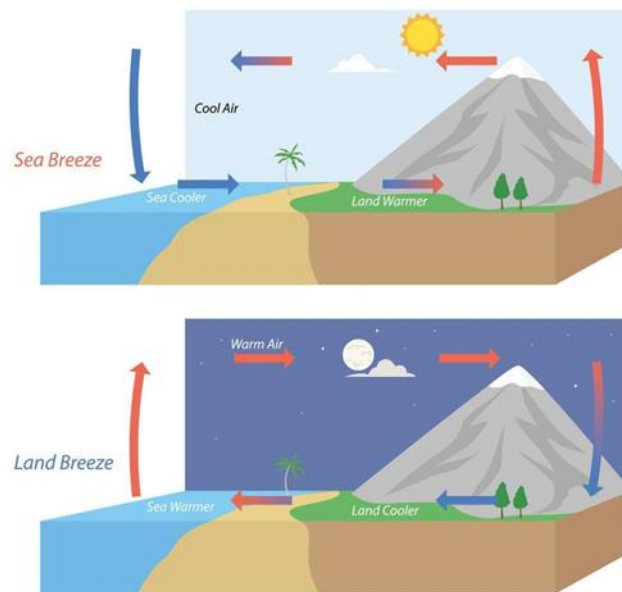


Figure 1.2. Brises de terre et de mer [7]

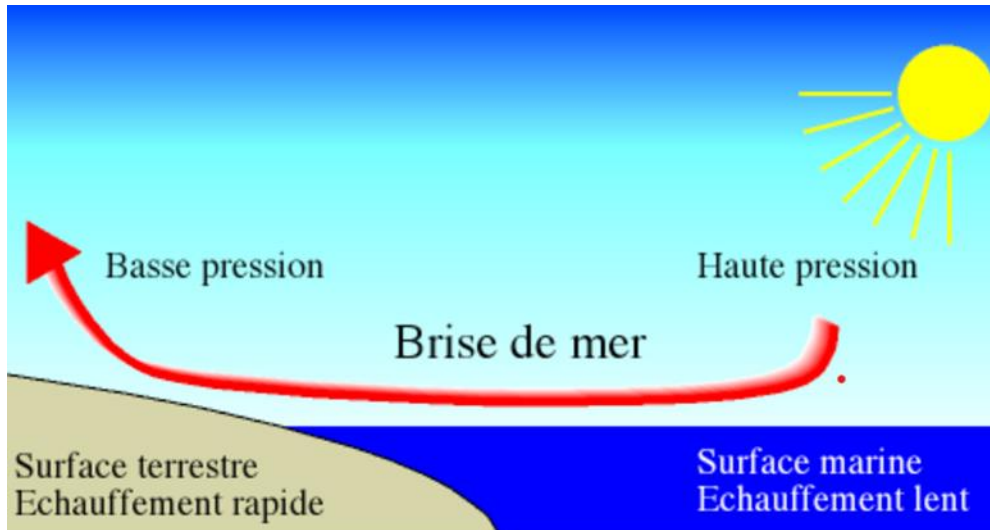


Figure 1.3. Brise de mer [8]

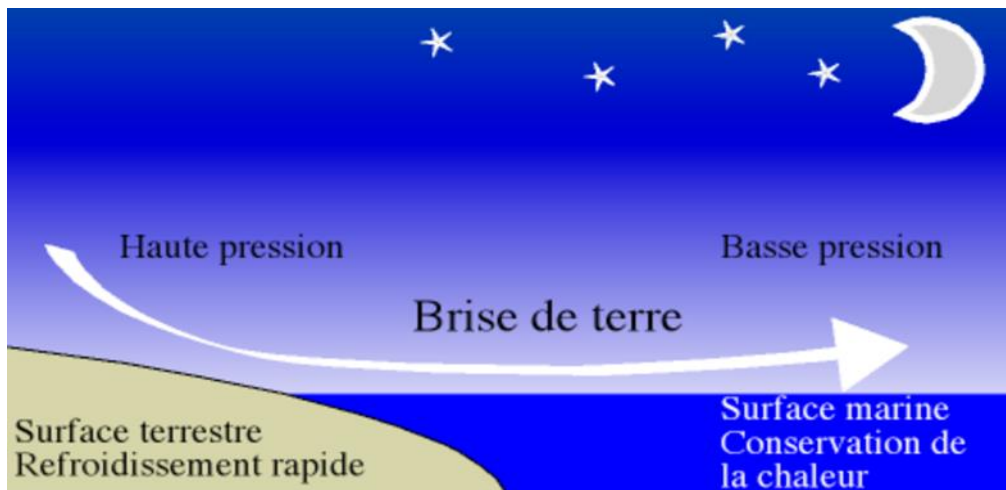


Figure 1.4. Brise de terre [9]

III. La ventilation naturelle :

1. Définition

La ventilation est définie comme le processus de remplacement de l'air intérieur par de l'air frais et d'extraction de l'air vicié, en utilisant des moyens naturels ou mécaniques, dans le but d'assurer le confort des occupants.[10]

Il est impératif pour l'hygiène et le confort de l'homme. Il exerce un effet direct sur le corps humain par l'effet physiologique de la purification et du mouvement de l'air, et un effet indirect par son influence sur la température et les niveaux d'humidité de l'air et des surfaces intérieures.[11]

2. Objectif de la ventilation :

La ventilation est au service de trois fonctions :[12]

- La première fonction : Le processus de maintien de la qualité de l'atmosphère intérieure d'un bâtiment est appelé « ventilation hygiénique ». Il s'agit de remplacer l'air intérieur vicié par de l'air extérieur frais, en veillant à ce que l'environnement intérieur reste dans les limites des paramètres acceptables pour la qualité de l'air. Il est impératif que ce processus soit mis en œuvre dans toutes les conditions climatiques afin de préserver la santé et le bien-être des occupants du bâtiment.
- La seconde fonction : L'objectif est d'assurer le confort thermique en augmentant la perte de chaleur du corps et en le protégeant de l'inconfort causé par l'humidité de la peau. Ce processus pourrait être désigné comme « la ventilation du confort thermique ».

- La troisième fonction : Le processus de refroidissement d'un bâtiment implique la dissipation de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur de la structure, réduisant ainsi la température interne. Ce phénomène est connu sous le nom de « refroidissement par ventilation ».

L'importance relative de chacune de ces trois fonctions dépend des conditions climatiques qui prévalent dans les différentes saisons et régions. Chaque fonction introduit des flux d'air d'un ordre de grandeur différent, et leur mise en œuvre dans les bonnes conditions nécessite divers détails de conception. Il est évident que les exigences varient considérablement d'une saison à l'autre dans la plupart des régions. Par conséquent, la conception doit être capable de satisfaire toutes les exigences dans ces conditions variables.

3. Le mécanisme de la ventilation naturelle :

Le phénomène en question repose sur deux phénomènes fondamentaux : le vent et les courants d'air thermiques. La génération de ces phénomènes est une conséquence des différences de pression dans un bâtiment, résultant des disparités de température entre l'intérieur et l'extérieur de la structure, en plus de la pression du vent exercée sur le bâtiment.

- Le vent exerce une pression sur l'extérieur du mur du côté au vent, tandis qu'une pression négative est appliquée du côté sous le vent. Par conséquent, l'air entre par les ouvertures de la façade face au vent et sort dans la zone de pression négative du toit.
- La différence de température crée une différence de pression, qui entraîne à son tour l'expulsion de l'air à l'extérieur du bâtiment par l'effet de cheminée (surpression). Le processus d'équilibre de la pression se définit comme l'expulsion de l'air chaud vers le haut, qui crée à son tour un courant d'air froid dans la partie inférieure du bâtiment (pression négative).[13]

Il est évident que ces deux forces motrices peuvent être utilisées en combinaison ; cependant, il est plus courant que les concepteurs donnent la priorité à l'une plutôt qu'à l'autre lorsqu'ils définissent la conception architecturale d'un bâtiment.

Le choix de l'un ou l'autre facteur dépend de la nature de l'édifice et de son efficacité spatiale, ainsi que des conditions climatiques et des régimes de vent qui prévalent dans l'environnement construit. La section suivante vise à présenter une gamme non exhaustive de stratégies de ventilation naturelle.[14]

2. Les stratégies de la ventilation naturelle :

A. Ventilation à simple exposition :

La plupart des gens associent la ventilation naturelle à l'ouverture des fenêtres pour permettre à l'air de pénétrer naturellement dans les pièces. Cette approche de la ventilation est considérée comme la plus naturelle et la plus répandue, en particulier dans les pays aux climats tempérés et chauds où la ventilation naturelle est la principale méthode de conditionnement de l'espace. La circulation de l'air à travers les ouvrants est due aux effets combinés du vent et du tirage thermique. Le vent se distingue par une composante de vitesse moyenne et des fluctuations. Dans le cadre d'une exposition simple, ce sont les fluctuations qui génèrent en premier lieu un effet de pompage, mais l'effet prédominant est souvent le tirage thermique. Dans les situations où la température interne est plus élevée que la température externe, l'effet de tirage thermique devient dominant. Cet effet fait que l'air extérieur plus froid (et donc plus lourd) s'écoule dans les parties inférieures des bouches, tandis que l'air intérieur plus chaud (et donc plus léger) s'écoule par les parties supérieures des bouches.[15]

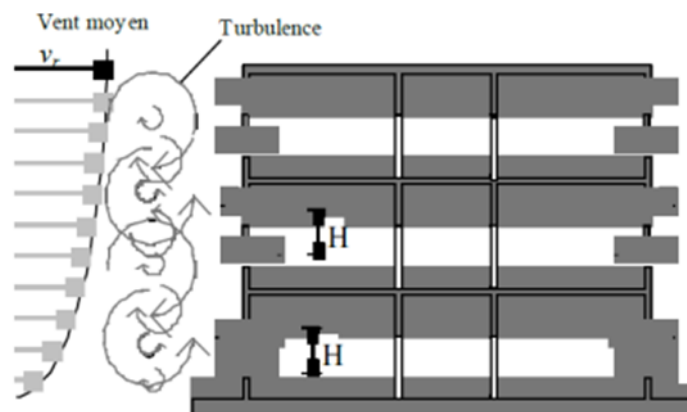


Figure 1.5. Ventilation à simple exposition due au vent [16]

B. Ventilation transversale :

La ventilation transversale est définie comme le processus par lequel l'air entre dans un bâtiment par une façade, traverse l'ensemble de la structure et ressort par la façade opposée. La ventilation naturelle est principalement assurée par la force du vent dans le cas d'ouvertures simples telles que les fenêtres. La ligne directrice recommandée est de limiter la

profondeur à moins de cinq fois la hauteur du plafond (environ 15 m). Cette règle géométrique est primordiale pour plusieurs raisons.

Il est évident que le différentiel de pression entre l'entrée et la sortie d'air est plus important que dans le cas d'une ventilation à exposition unique. Toutefois, ce différentiel reste négligeable. Une augmentation de la perte de charge résultant d'une plus grande profondeur réduira par conséquent le débit de ventilation.

Si la structure est trop profonde, les occupants situés du côté de la sortie d'air seront exposés à de l'air vicié plutôt qu'à de l'air frais, ce qui entraînera une mauvaise qualité de l'air intérieur.[17]

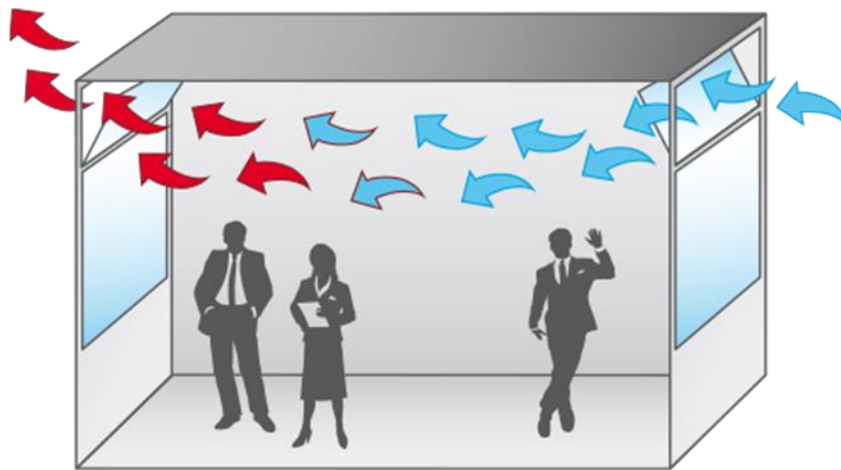


Figure 1.6. Ventilation Transversale [18]

C. Ventilation naturelle par tirage thermique :

Il est évident que le phénomène de flottabilité, tel que postulé par Archimède, entraîne l'ascension de l'air chaud et la descente de l'air froid. Ce principe fondamental peut être utilisé efficacement dans le contexte de la ventilation des bâtiments.[19]

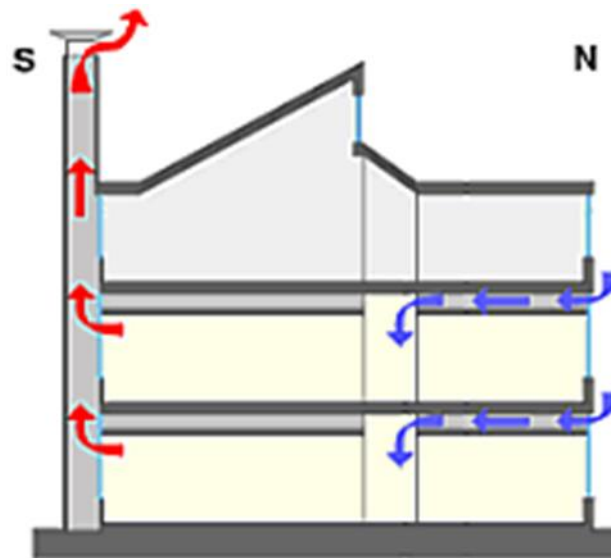


Figure 1.7. Ventilation naturelle par tirage thermique [20]

En période de températures élevées, lorsque les températures extérieures et intérieures sont similaires, le phénomène d'« ascenseur thermique » est généralement minime, à l'exception des bâtiments de grande hauteur, par rapport à l'effet dynamique du vent.

Inversement, pendant les périodes de températures plus basses, le différentiel de température est suffisant pour assurer la ventilation par tirage thermique, facilitant ainsi le renouvellement de l'air nécessaire au maintien de la qualité de l'air intérieur, à condition que les entrées et sorties d'air soient conçues et gérées de manière adéquate. Le vent et la ventilation naturelle²⁶ sont dimensionnés. Inversement, pendant les périodes où les températures sont plus élevées, le tirage thermique peut rencontrer des difficultés à fournir un débit d'air adéquat pour assurer une ventilation efficace de refroidissement et de confort.

Dans de telles circonstances, il serait préférable d'orienter la conception vers l'utilisation directe des effets dynamiques du vent, ou de combiner ingénieusement les deux phénomènes.[21]

D. Effets combinés du tirage thermique et du vent :

Il est évident qu'une conception efficace peut faciliter l'exploitation des effets combinés du vent et du tirage thermique. Pour illustrer ce concept, considérons un système de ventilation à tirage thermique soumis aux effets combinés du vent et du tirage thermique. Le principe sous-jacent reste cohérent avec celui du tirage thermique, à l'exception de l'incorporation d'un

dispositif qui facilite l'utilisation de la pression négative causée par le vent. Ce dispositif sert à prolonger la cheminée, permettant ainsi l'utilisation de la dépression générée par le vent.[22]

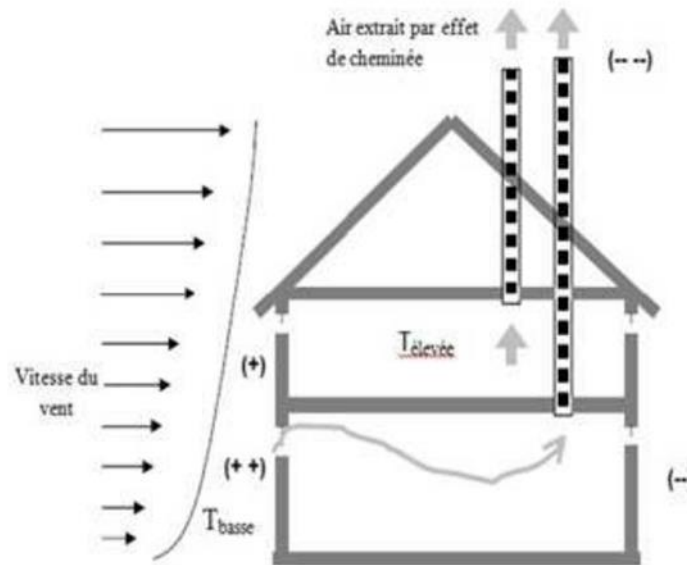


Figure 1.8. Effets combinés du vent et du tirage thermique [23]

E. Ventilation naturelle par équilibrage de conduits :

L'utilisation de conduits dans les systèmes de ventilation naturelle s'est avérée efficace pour surmonter la majorité des problèmes liés à la ventilation à exposition unique. Dans certains cas, la mise en œuvre de ces systèmes a permis d'améliorer les stratégies de ventilation traversante en équilibrant les flux d'air dans les différentes pièces d'un bâtiment. La prévalence de ces systèmes peut être attribuée à leur capacité à répondre aux limites des méthodes de ventilation conventionnelles. Leur intégration dans la conception des bâtiments contemporains témoigne de leur efficacité et de la reconnaissance croissante de leurs avantages.[24]

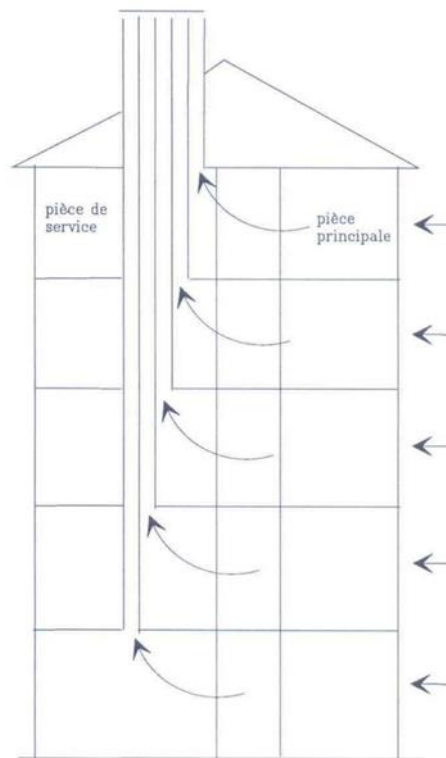


Figure 1.9. Ventilation par conduits à tirage-naturel détails des types de conduits de haut en bas [25]

3. Avantages de la ventilation naturelle

- La ventilation est essentielle pour assurer la sécurité, le confort et la santé des occupants d'un bâtiment. Cela est possible sans avoir recours à des ventilateurs.
- Le refroidissement passif est obtenu en l'absence de système thermodynamique.
- Le coût de la construction et de l'utilisation des bâtiments est réduit lorsque la conception est exécutée avec une attention méticuleuse aux détails.
- Il en résulte une réduction de la consommation d'énergie liée au système de conditionnement et aux ventilateurs.
- Elimine les bruits de ventilateurs.

4. Différentes cavités utilisées en ventilation naturelle

Les cheminées solaires, les façades doubles peau et les murs trombe représentent une gamme de cavités ouvertes qui ont été spécifiquement conçues pour exploiter l'énergie solaire à des fins de chauffage passif, de ventilation naturelle et, dans le cas de la façade double peau, d'apport de lumière du jour. La figure 1.10 illustre les trois types de cavités pour le chauffage

passif et la ventilation naturelle dans les bâtiments. La poussée thermique est le mécanisme prédominant de la circulation de l'air dans ces cavités ouvertes.[26]

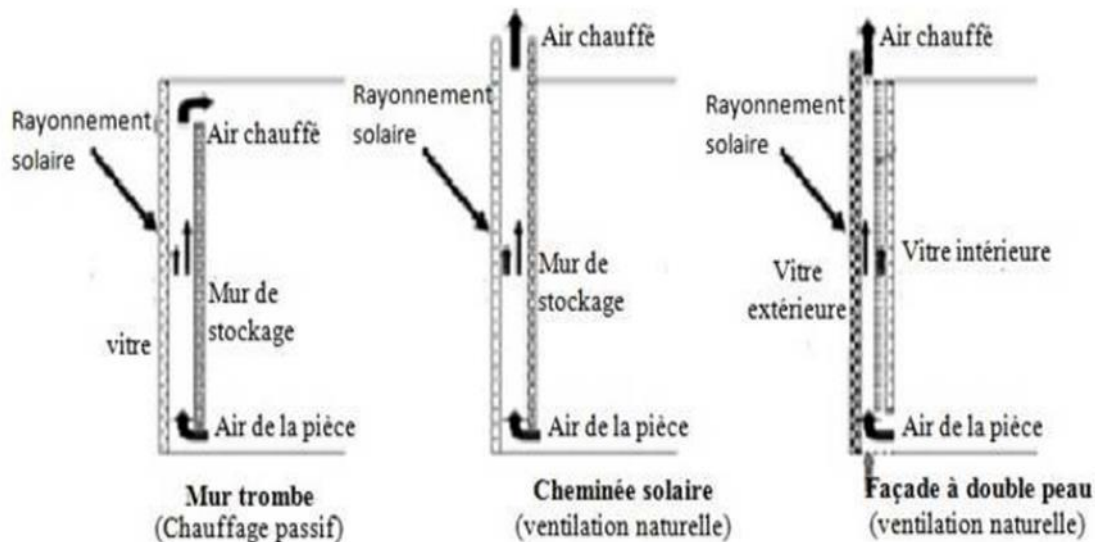


Figure 1.10. Diagramme schématique de trois types de cavité pour le chauffage passif et la ventilation naturelle [27]

A. Le mur trombe :

Le mur Trombe-Michel, également connu sous le nom de mur Trombe, fonctionne sur le même principe physique que le mur capteur. Le rayonnement solaire réchauffe une couche d'air entre un vitrage à faible émissivité et un mur à forte inertie thermique. Un système de volets, positionnés stratégiquement aux extrémités supérieure et inférieure du mur, facilite la circulation de l'air entre l'intérieur de la pièce et la couche d'air chauffée. Deux modes de fonctionnement ont été identifiés.[28]

B. La cheminée solaire :

Il est évident que la cheminée solaire présente une similitude structurelle et fonctionnelle avec le mur trombe. Les deux systèmes se distinguent par le fait que le mur trombe absorbe

l'énergie solaire et que le recyclage de l'air chaud permet de chauffer passivement le bâtiment. La cheminée solaire, en revanche, fonctionne uniquement comme un système de ventilation pendant la journée, sans recyclage de l'air.

C. La façade à double peau :

La façade à double paroi d'un bâtiment se compose d'une couche intérieure et d'une couche extérieure, assurant ainsi l'isolation thermique de la structure. L'objectif de la façade à double paroi est de réguler les conditions thermiques à l'intérieur du bâtiment. Il a été démontré que la façade à double peau offre un certain nombre d'avantages au bâtiment. Premièrement, elle agit comme un bouclier contre la lumière directe du soleil, évitant ainsi la surchauffe en été et limitant la consommation d'énergie. Deuxièmement, elle protège du froid en hiver. Troisièmement, elle élimine le besoin de climatisation. Il a été démontré qu'en évitant l'action directe du vent, l'effet de paroi froide est éliminé en hiver, évitant ainsi l'inconfort à l'intérieur. La température et l'humidité de l'air sont également agréables. [29]

D. Les écopos :

Il s'agit de grandes prises d'air intégrées au toit. Il a été démontré qu'une telle configuration améliore la capacité de ventilation inhérente à un logement, un élément essentiel dans les climats caractérisés par des températures élevées. Ces prises d'air facilitent la ventilation des espaces de vie centraux, un aspect crucial pour les volumes intérieurs qui sont entièrement ventilés. En outre, elles sont particulièrement adaptées aux bâtiments à faible porosité. Deux types distincts de bouches ont été identifiés :

- Il a été démontré que les écopos ouvertes orientées vers le vent augmentent le flux d'air vers l'intérieur. Inversement, celles qui sont orientées vers le vent facilitent l'extraction des flux de l'intérieur.
- L'efficacité des bouches d'extraction par rapport aux bouches d'admission s'explique par la capacité des premières à créer une légère dépression et une pression interne.

E. Les tours à vent :

La tour à vent telle que son nom l'indique, est un outil de ventilation utilisé pour obtenir un refroidissement naturel. Elle a été employée pendant des siècles dans les pays à climat chaud et aride, en particulier en Iran, Les tours à vent dans les villes centrales de l'Iran sont connues en tant que « Badgir » voulant dire capteurs à vent.

F. Les dômes :

Cette technique de construction est utilisée depuis l'Antiquité. Elle est principalement associée aux pays du Maghreb et du Proche-Orient, en particulier l'Algérie, l'Égypte, la Jordanie, la Palestine et la Tunisie. Il s'agit d'une construction très polyvalente, qui trouve des applications dans un large éventail de contextes environnementaux, y compris les régions urbaines, rurales, de plaine, montagneuses et côtières. La technique est employée au rez-de-chaussée, au premier étage ou au dernier étage.[30]

Chapitre II :

Analyse climatique et bioclimatique

Introduction :

Le climat est défini comme l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné et son évolution dans le temps. Ce chapitre contient les analyses climatiques et bioclimatique relatives à la wilaya de Tlemcen. L'analyse climatique repose essentiellement sur certains éléments et facteurs, notamment la température, L'humidité, le vent, les radiations solaires et les précipitations dans un endroit particulier et travers une période de temps.

L'architecture bioclimatique est une méthode de conception qui consiste à trouver le meilleur équilibre entre un bâtiment, le climat ambiant et le confort des habitants.

Une maison bioclimatique est un bâtiment qui tire le meilleur parti des rayons du soleil et de la circulation naturelle de l'air pour maintenir des températures agréables, contrôler l'humidité et favoriser l'éclairage naturel, tout en réduisant les besoins en énergie.

I. Pourquoi le confort ?**1. Définition**

Le confort est une notion globale : Chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure, prestige.... et autre, sont autant d'éléments définissant plusieurs paramètres climatiques, esthétiques, psychologiques du confort. Le confort est également la sensation subjective qui n'existe pas en lui-même. [31]

2. Le confort respiratoire

On ne saurait trop insister sur l'importance d'une bonne qualité de l'air intérieur grâce à la ventilation, notamment en ce qui concerne les processus métaboliques et l'hygiène personnelle. Les preuves scientifiques indiquent qu'une ventilation efficace et l'atténuation des polluants à leur source garantissent une fonction respiratoire optimale et améliorent la santé en général. Dans plusieurs études, il a été proposé de mesurer la qualité de l'air sur la base de la concentration de dioxyde de carbone [32]. Une gamme de concentrations de dioxyde de carbone a été établie, correspondant à une qualité d'air acceptable. Le processus respiratoire humain est la principale source de production de dioxyde de carbone, et sa concentration ne peut être réduite de manière significative qu'en assurant une ventilation naturelle ou artificielle suffisante. Il est impératif de noter que le degré de ventilation requis pour maintenir de faibles niveaux de dioxyde de carbone à l'intérieur sert également à réduire les concentrations d'autres polluants intérieurs, améliorant ainsi la qualité globale de l'atmosphère intérieure.

3. Le confort thermique

Dans les environnements bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle, à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre variables physiques : la température de l'air, l'intensité du rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air. Ces variables interagissent avec l'activité et l'habillement du corps humain pour établir son état thermique, et forment collectivement les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. [33]

4. Le confort pour la santé

Il est important de noter que certains éléments de l'environnement intérieur peuvent entraîner des complications pour la santé. On sait que la sensibilité à ces problèmes varie en fonction de facteurs tels que l'âge, le sexe et l'état de santé général. Toutefois, le facteur prédominant qui détermine la sensibilité d'un individu à ces problèmes est sa propre réaction personnelle à l'environnement. Une autre distinction peut être faite entre les problèmes de santé objectifs et subjectifs.

5. Le confort pour le bâtiment

La majorité des problèmes liés aux bâtiments sont imputables à la présence d'humidité indésirable. La présence d'humidité dans un logement peut être attribuée à divers facteurs, notamment des fuites dans le toit, des solins mal finis, des fenêtres ou des portes qui ne ferment pas correctement, de la condensation sur les ponts thermiques, des remontées d'humidité et des fuites dans les canalisations.

L'impact négatif de l'humidité sur l'intégrité structurelle d'un bâtiment et les implications potentielles pour la santé qu'elle engendre ont été bien documentés. Voici quelques-unes des conséquences les plus courantes de l'humidité :

Détérioration des finitions : peinture, papier peint, plafonds, etc.

Le développement de moisissures, qui peuvent compromettre l'intégrité structurelle du bâtiment ou l'intégrité de ses éléments en bois. La réduction de la capacité d'isolation de la propriété.

II. ANALYSE CLIMATIQUE DE LA REGION DE TLEMCEN**1. Localisation :**

La wilaya de Tlemcen est située au nord-ouest de l'Algérie

La géographie de Tlemcen :

34° 53' 24'' nord, 1° 19' 12'' ouest

Altitude : min. 842 m

2. Les limites :

Au nord par la mer méditerranée, au nord-est par la wilaya d'Ain Témouchent, à

L'est par la wilaya de sidi bel Abbas, à l'Ouest par le Maroc et au sud par la wilaya de Naâma.

3. La Température de l'air

La température est un état instable dont les variations au voisinage de l'environnement humain dépendent de rayonnement solaire, du vent, de l'altitude et la nature du sol. [34]

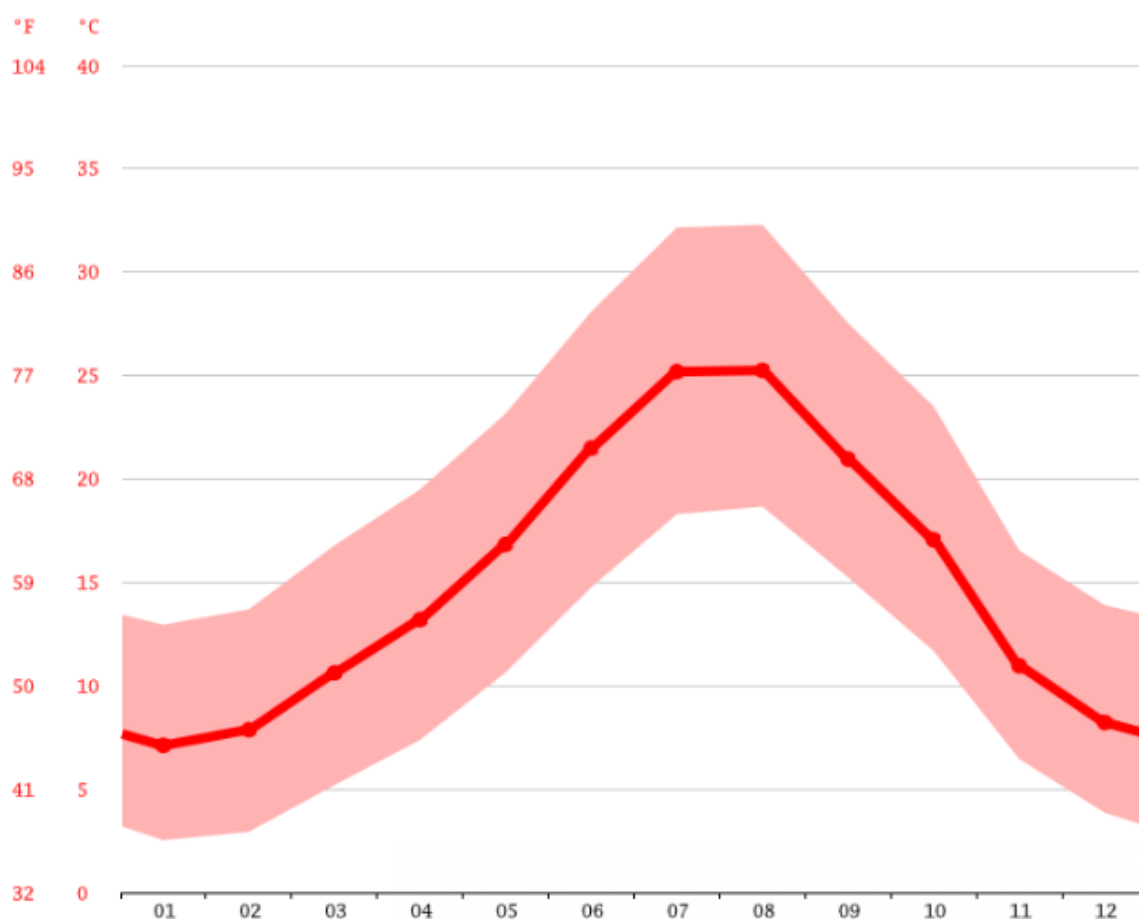


Figure 2.1 : la température de l'Aire extérieur dans la région de Tlemcen [35]

Commentaire :

D'après le graphe des températures moyennes mensuelles on distingue une variation saisonnière qui prend la même allure que la variation mensuelle :

- Une température presque constante au mois de janvier et février (11° - 12.5°)
- Une augmentation élevée de mars (13.5°C) à Aout (27°C)
- Le pic au mois d'Aout (27°C)
- Une diminution de température d'Aout à décembre (12°C)

La région est donc caractérisée par deux saisons :

- **Une saison froide** : allant du mois de novembre à avril avec des températures minimales entre 5°C et 10°C , la moyenne de température froide est de 6.66°C
- **Une saison chaude** : allant du mois du mai au mois d'octobre avec une température maximale entre 30°C en juin et de 34°C en Aout, la moyenne de température de période chaude 32°C

4. Humidité relative :

L'air est composé de deux éléments constitutifs : l'air sec et la vapeur d'eau. L'humidité relative (HR) est définie comme le rapport entre la quantité maximale d'eau pouvant être contenue dans l'air sous forme de vapeur à une température donnée, exprimée en pourcentage de la quantité d'eau effectivement présente dans l'air.

Les facteurs qui influencent l'humidité relative sont les précipitations, le type de végétation, le type de sol, les conditions de vent et l'ensoleillement, qui peuvent tous avoir un effet négatif sur la température. À l'inverse, l'ensoleillement peut favoriser le processus de séchage. [36]

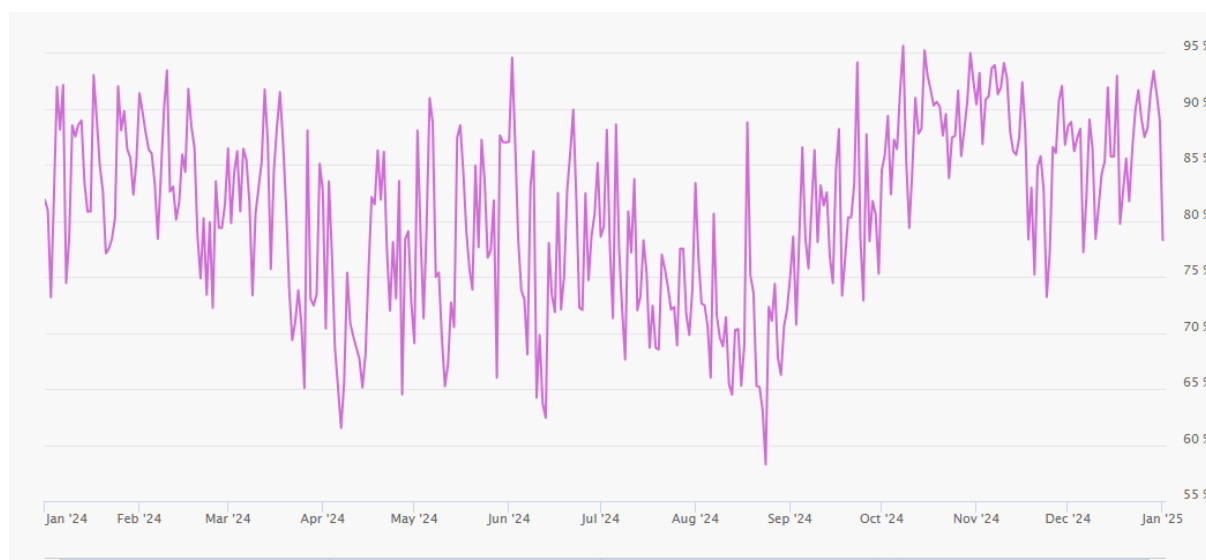


Figure 2.2. Humidité relative sur la région de Tlemcen 2024 [37]

Interprétation :

L'analyse de l'humidité relative sur l'ensemble de l'année 2024 à Tlemcen révèle une forte variabilité saisonnière, typique d'un climat méditerranéen à influence semi-aride intérieure. On distingue clairement deux périodes principales : une saison sèche, correspondant aux mois chauds (de juin à septembre), et une saison humide, s'étendant de l'automne au printemps (d'octobre à mai).

Durant l'été, l'humidité relative est souvent basse, descendant fréquemment en dessous de 60 %, ce qui accentue les effets de la chaleur et impose des stratégies architecturales de protection solaire et de rafraîchissement passif (ventilation naturelle, inertie thermique). Cette période coïncide avec une atmosphère sèche et des écarts thermiques importants entre le jour et la nuit.

En revanche, l'hiver et les saisons de transition (automne et printemps) présentent une humidité plus élevée, dépassant régulièrement les 80 %, et atteignant jusqu'à 95 %. Cette humidité soutenue est en lien avec les précipitations saisonnières et les températures plus basses, ce qui peut générer un risque de condensation dans les bâtiments mal ventilés.

Globalement, cette répartition de l'humidité influence fortement les choix bioclimatiques pour l'habitat : ventilation et protections estivales en été, isolation thermique et gestion de l'humidité en hiver.

5. Le vent :

Le vent est défini comme un mouvement horizontal de l'air d'une zone de haute pression (masse d'air froid) vers une zone de basse pression (masse d'air chaud). Ce phénomène se produit lorsqu'une masse d'air froid se déplace vers une zone de basse pression, entrant en collision avec une masse d'air chaud. Les différences de température entre ces masses d'air sont dues à l'action du soleil. [38]

Le vent se caractérise par :

- ✓ La vitesse m/s
- ✓ La direction

Tableau 1 : la direction du vent annuelle à Tlemcen [39]

mois	Jan	fév	mars	avril	mai	Juin	Juil	Aout	sept	Oct	Nov	dec
------	-----	-----	------	-------	-----	------	------	------	------	-----	-----	-----

Direction dominante du vent	NW	NW	W-SW	SW	SW	S-SE	E-NE	E	NE-N	NW	W-NW	NW
-----------------------------	----	----	------	----	----	------	------	---	------	----	------	----

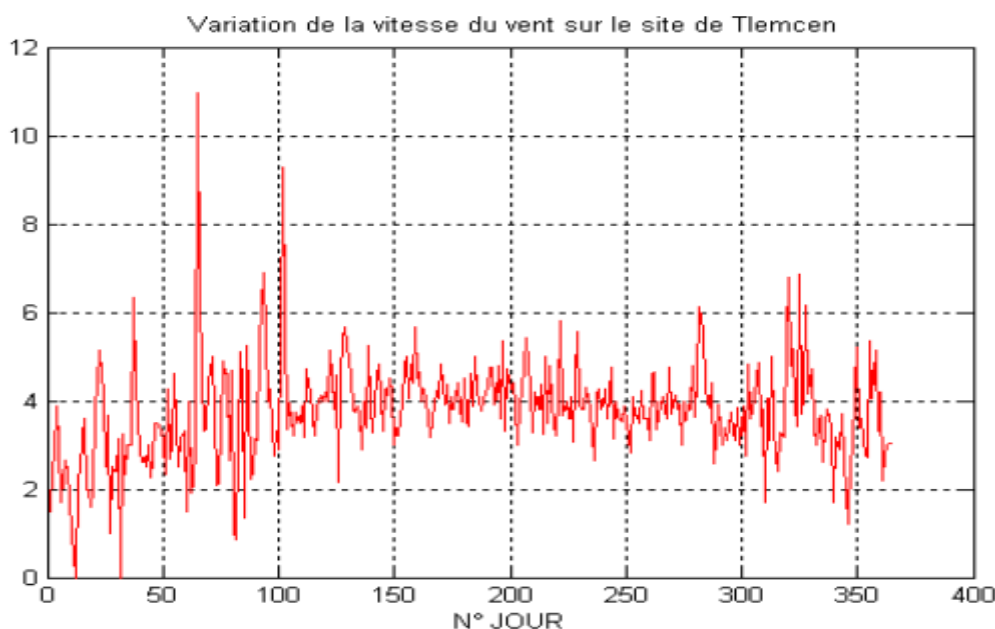


Figure 2.3.la variation de la vitesse du vent sur le site de Tlemcen [40]

Interprétation :

D'après le graphe on remarque que la vitesse du vent à Tlemcen présente une variation saisonnière marquée. On observe que les vitesses les plus élevée sont enregistrées durant la période hivernale, notamment entre novembre et avril avec des pics significatifs pouvant dépasser 15 km/cette période est caractérisée par des perturbations atmosphériques plus fréquentes, ce qui favorise des vents plus intenses.

En revanche, durant les mois d'été (juin à Aout), la vitesse du vent diminue sensiblement, atteignant des moyennes autour de 10 à 12 km/cette baisse s'explique par la stabilité atmosphérique et la prédominance de conditions anticycloniques, typiques de la saison chaude dans cette région semi-aride.

Globalement, le mois le plus venteux est décembre, tandis que le mois le plus calme est Aout.

6. Précipitation :

Les précipitations peuvent être classées sous différentes formes, notamment la pluie, la grêle et la neige, qui sont toutes des manifestations d'un processus sous-jacent commun : le cycle de l'eau.

La Terre contient environ 1,4 milliard de km³ d'eau, dont plus de la moitié se trouve dans les océans.

La Terre contient environ 1,4 milliard de km³ d'eau, dont plus de 97 % se trouvent dans les océans. Une fraction négligeable (0,0259 %) est présente sur terre sous forme de neige.

L'eau est présente à la surface de la Terre sous forme de neige, de glace et d'eau souterraine.

Seule une infime partie (0,014 %) est accessible aux organismes vivants.[41]

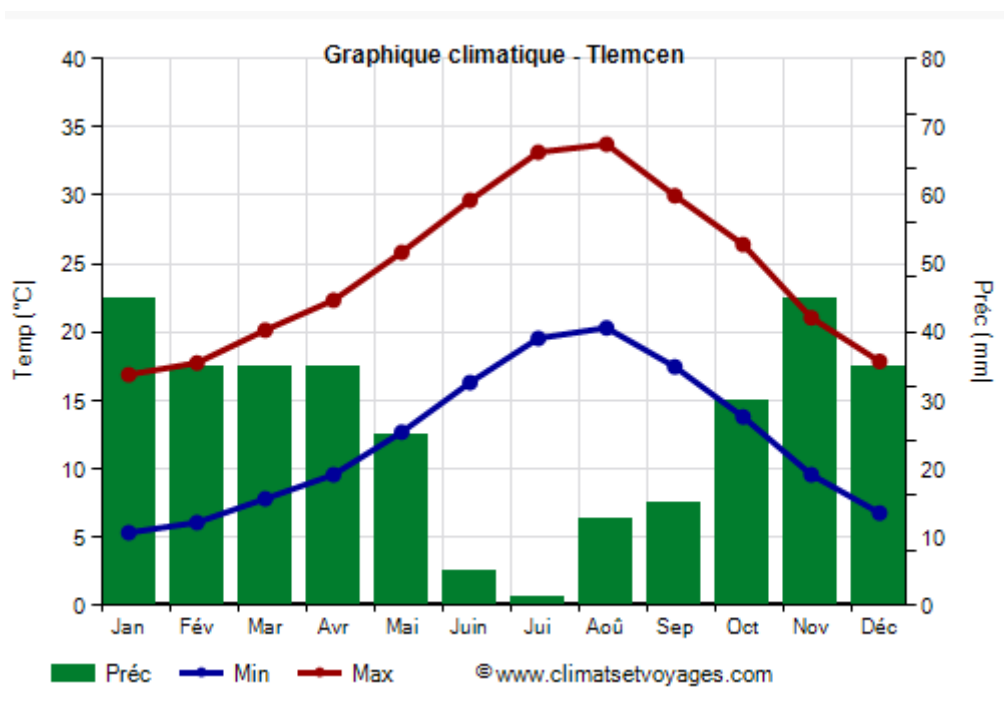


Figure 2.4 : variation de la précipitation sur le site de Tlemcen [42]

Interprétation :

- Période hivernale (novembre à mars) :

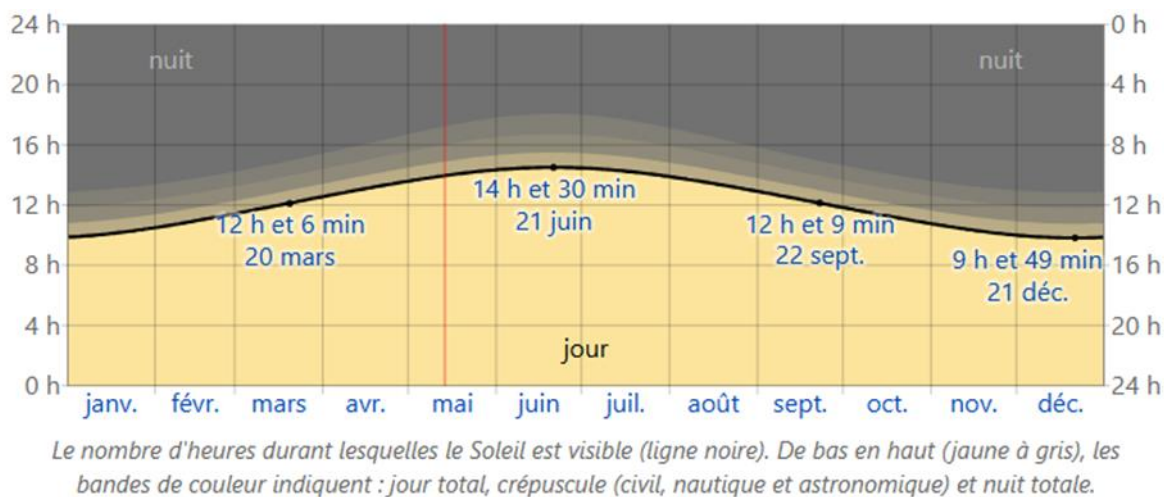
Cette période enregistre les plus fortes précipitations. Janvier semble être le mois le plus pluvieux avec environ 70 mm suivi de novembre et décembre, avec des valeurs autour de 50 à 60 mm.

- Période estivale (juin à août) :

Les précipitations chutent drastiquement, atteignant moins de 10 mm, voir quasi nulles en juillet et août. Cela correspond à une saison sèche typique du climat méditerranéen.

- Saison intermédiaires (avril-mai et septembre-octobre) :

7. Ensoleillement



Figures 2.5. Ensoleillement de la région de Tlemcen [43]

- Interprétation

➤ Du 20 mars au 21 juin :

La durée du jour augmente progressivement.

Début : environ 12h06 min le 20 mars (équinoxe de printemps).

Fin : environ 14h30 min le 21 juin (solstice d'été).

Chaque jour, le Soleil se lève un peu plus tôt et se couche un peu plus tard.

- Évolution :

Le jour gagne en moyenne environ 5 à 6 minutes par jour.

Les nuits deviennent plus courtes.

Vers la fin du printemps, les journées sont longues, lumineuses et agréables.

- Impact :

Meilleure production d'énergie solaire.

Activités extérieures facilitées par les températures douces et la lumière croissante.

➤ Du 21 juin au 23 septembre

- Caractéristiques de l'ensoleillement :

Le jour est le plus long de l'année.

Maximum atteint le 21 juin avec environ 14h30 min de soleil.

Puis il commence à raccourcir lentement après le solstice d'été.

- Évolution :

Le lever du Soleil reste très tôt (vers 5h30 – 6h).

Le coucher du Soleil reste tardif (vers 19h30 – 20h).

Malgré la diminution progressive, les jours restent longs jusqu'à la fin de l'été.

➤ Du 23 septembre au 21 décembre

- Caractéristiques de la l'ensoleillement :

La durée du jour diminue progressivement.

Début : environ 12h09 min le 22 septembre (équinoxe d'automne).

Fin : environ 9h49 min le 21 décembre (solstice d'hiver).

- Évolution :

Le jour perd en moyenne environ 5 à 6 minutes par jour.

Les nuits deviennent plus longues.

Le lever du Soleil devient plus tardif, et le coucher plus précoce.

➤ Du 21 décembre au 20 mars

- Caractéristiques de la l'ensoleillement :

Le jour est le plus court de l'année.

Minimum atteint le 21 décembre avec environ 9h49 min de soleil.

Puis il commence à s'allonger lentement vers la fin de l'hiver.

- Évolution :

Lever du Soleil tardif (vers 7h30 – 8h).

Coucher du Soleil précoce (vers 17h15 – 17h30).

Progressivement, la durée du jour augmente légèrement chaque jour.

III. Analyse Bioclimatique de la région de Tlemcen

L'étude bioclimatique du site a pour objet :

De repérer soigneusement les opportunités macro physiques offertes par le lieu : relief,

Orientation, type de sol, accès, végétation, ensoleillement, ainsi que les agressions qu'il faudra

Gérer : pluies, vents dominants, froid, risques liés au site.

À fin d'effectuer les choix qui s'imposent au niveau des énergies renouvelables et elle détermine également les dispositifs architecturaux utilisés dans la conception.

Pour l'analyse bioclimatique on s'est basé sur l'utilisation du tableau de MAHONEY et le diagramme bioclimatique de B.GIVONI consultant pour faire sortir les recommandations concernant la région.

A. Synthèse des tableaux de Mahoney

Tableau I

Tableau 2 : Données climatiques mensuelles [44]

Mois	T Moy (°C)	T Max (°C)	T Min (°C)	Amplitude (°C)	Humidité (%)	Pluie (mm)	J. Pluie
Janvier	7.1	13.0	2.5	10.5	69	62	7
Février	7.9	13.7	2.9	10.8	69	52	5
Mars	10.6	16.8	5.2	11.6	67	59	5
Avril	13.2	19.5	7.4	12.1	65	55	6
Mai	16.8	23.2	10.6	12.6	61	38	4
Juin	21.5	28.1	14.8	13.3	55	11	2
Juillet	25.2	32.2	18.3	13.9	48	2	0
Aout	25.3	32.3	18.7	13.6	50	5	1
Septembre	21.0	27.5	15.2	12.3	59	23	3
Octobre	17.1	23.5	11.7	11.8	63	41	4
Novembre	11.0	16.5	6.5	10.0	67	61	6
Décembre	8.2	13.9	3.9	10.0	70	45	5

Tableau II

Tableau 3 : Interprétation Bioclimatique (codes Mahoney) [45]

Mois	T Moy (°C)	Humidité (%)	Amplitude (°C)	Pluie (mm)	J. Pluie	codes mahoney
Janvier	7.1	69	13.5	62	7	H , F , P
Février	7.9	69	10.8	52	5	H , F
Mars	10.6	67	11.6	59	5	H , A , F
Avril	13.2	65	12.1	55	6	H , A , F , P
Mai	16.8	61	12.6	38	4	H , A , F , D
Juin	21.5	55	13.3	11	2	A , C , D
Juillet	25.2	48	13.9	2	0	A , C , D
Aout	25.3	50	13.6	5	1	A , C , D
Septembre	21.0	59	12.3	23	3	A , C , D
Octobre	17.1	63	11.8	41	4	H , A , F , D
Novembre	11.0	67	10.0	61	6	H , F , P
Décembre	8.2	70	10.0	45	5	H , F

Légende des codes :**H** : chauffage requis**A** : orientation spécifiques nécessaire**F** : forte amplitude thermique (inertie nécessaire)**D** : besoin d'inertie thermique pour atténuer la variation**C** : refroidissement requis (ventilation naturelle)**P** : protection contre la Pluie (débord soubassement)**Recommandation :**

De l'étude des tableaux de mahoney appliquées à la région de Tlemcen nous concluons les recommandations suivantes :

- climat : sec à semi-aride
- Eté chaude et sec, hiver frai et humide
- Besoin de protection contre la chaleur estivale et la fraîcheur hivernale
- Orientation : longe façade orienté nord-sud pour limitée les apports solaires
- Les murs : épais, à forte inertie thermique pour lisser les variations de température
- Toiture : isolation thermique importante, toits clairs ou végétalisés
- Taille moyenne des ouvertures de 25% à 40%.
- Protection des ouvertures contre les rayonnements directs et contre la pluie.

B. Diagramme de Givoni :

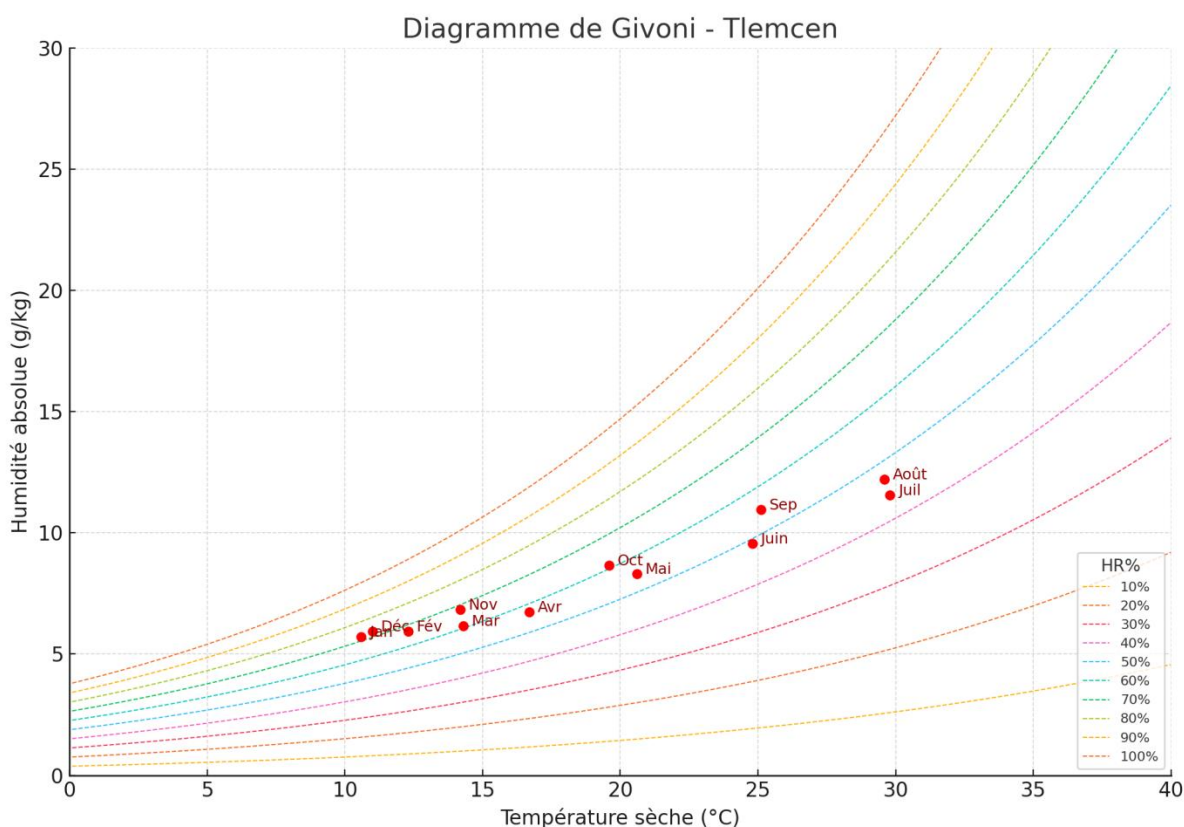


Figure 2.6 : Diagramme Psychrométrique d'après B.GIVONI appliqué à la région de Tlemcen

Givoni a élaboré une méthode expérimentale où il représente les limites des ambiances confortables sur un diagramme psychrométrique courant. Il a défini le confort en considérant la personne, par l'intermédiaire de son diagramme bioclimatique, dont la zone de confort est positionnée dans l'intervalle (22°C-28°C) de température, 80% humidité relative. Le

diagramme de GIVONI appliqué à la région de Tlemcen permet de définir les moyens d'intervention par les dispositifs architecturaux ou techniques qu'on va utiliser pour parer aux agressions du climat et les sollicitations du confort de l'être humain.

- Période de confort : Le confort thermique est marqué pour la période représentée par une grande partie des mois d'avril, juin et novembre, et une plus petite partie des mois de janvier, mars, mai, juillet, août, octobre et décembre.
- Période chaude : La ventilation naturelle et mécanique est nécessaire pendant la période des mois chauds. Mai, juin, juillet, août, septembre, octobre.

Les mois de juin, juillet, août et septembre sont particulièrement importants en termes de vitesse de l'air.

Le processus de déshumidification consiste à absorber les particules d'eau présentes dans l'air au moyen de matériaux tels que le béton cellulaire.

C. Synthèse de l'analyse bioclimatique :

Après l'application des méthodes de Mahoney et Givonie, sur la région de Tlemcen on aboutit aux recommandations suivantes :

- La ventilation naturelle est recommandée pour les mois chaud à fin d'assurer la fraîcheur en été, elle est ainsi recommandée pour les mois froids afin de diminuer le taux d'humidité élevé dans cette région ; ceci sera assuré par l'utilisation des dispositifs de ventilation passifs comme la tour à vent, le puits canadien, la cheminée solaire, la présence des espaces verts, l'orientation des fenêtres aux vents, l'orientation des bâtiments selon un axe EST-OUEST.
- L'utilisation des murs légers et toiture légère (faible inertie thermique)
- Le chauffage passif est recommandé pour la majorité des mois de l'année cela dépend du choix des matériaux, la bonne pénétration de rayonnement solaire surtout par la façade sud, la compacité de l'enveloppe pour limiter les déperditions. Et L'utilisation des dispositifs de chauffage passifs comme : la véranda, patio couvert.

Conclusion :

D'après l'analyse climatique de la région de Tlemcen, il ressort que cette région appartient à un climat méditerranéen caractérisé Par un hiver froid et humide et un été chaud et semi-humide, des vents moyennement faibles et une précipitation considérable en hiver et rare en été.

Après l'application des deux méthodes d'analyse bioclimatique, il ressort que le chauffage passif est recommandé pour la majorité des mois de l'année parce que le confort ne dépend pas seulement des dispositifs mécaniques, mais il est possible de l'atteindre avec le choix des matériaux (faible inertie pour notre cas), la bonne pénétration de rayonnement solaire surtout par la façade sud, la compacité de l'enveloppe pour limiter les déperditions. Et L'utilisation des dispositifs de chauffage passifs comme : la véranda, patio couvert.

Les besoins de la ventilation naturelle sont importants pour les deux périodes ; en été à fin d'assurer la fraîcheur, et en hiver pour diminuer le taux d'humidité élevé dans cette région ; ceci sera assuré par l'utilisation des dispositifs de ventilation passifs comme la tour à vent, le puits canadien, la cheminée solaire, la présence des espaces verts, l'orientation des fenêtres aux vents, l'orientation des bâtiments selon un axe EST-OUES

Chapitre III :

Modélisation

I. Introduction

Dans le cadre de la modélisation et la ventilation naturelle d'une maison bioclimatique. La modélisation repose sur la dynamique des fluides numérique (CFD – Computational Fluid Dynamics), une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques pour simuler le comportement des écoulements d'air à l'intérieur d'un bâtiment. L'objectif est de prédire les champs de pression, de vitesse et de température de l'air afin d'évaluer l'efficacité des stratégies de ventilation naturelle.

Ce chapitre est dédié à la présentation des concepts fondamentaux de la CFD, suivie d'une description détaillée du modèle mathématique utilisé. Ce modèle repose sur la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Étant donné que l'écoulement d'air dans un bâtiment est souvent turbulent, un modèle de turbulence, en l'occurrence le modèle k- ϵ (k-epsilon), est également introduit.

II. Généralités sur la CFD

La CFD (Computational Fluid Dynamics) permet d'étudier le comportement des fluides à l'aide de la simulation numérique. Elle repose sur la résolution numérique des équations de Navier-Stokes, qui décrivent l'écoulement des fluides newtoniens. En pratique, la CFD se décompose en plusieurs étapes :

- Création de la géométrie du domaine d'étude (dans notre cas, la maison bioclimatique).
- Génération d'un maillage qui divise ce domaine en un grand nombre de cellules de calcul.
- Application des conditions aux limites (température, vitesse, pression, parois).
- Résolution des équations de conservation sur chaque cellule du maillage.
- Analyse et visualisation des résultats (champs de vitesse, pression, température, etc.).

La CFD est un outil puissant pour simuler des phénomènes d'écoulement complexes. Elle permet de tester différentes configurations de bâtiments ou de systèmes sans recourir à des expériences physiques coûteuses. En architecture bioclimatique, elle est utilisée pour optimiser le confort thermique, réduire les besoins énergétiques, et concevoir des systèmes de ventilation naturelle efficaces.

III. Modèle mathématique

La modélisation physique de l'écoulement d'air repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides pour un fluide incompressible, turbulent et soumis à des variations de température. Ces équations traduisent les lois de conservation suivantes :

- Conservation de la masse (équation de continuité),

- Conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes),
- Conservation de l'énergie (équation thermique),
- Modélisation de la turbulence (modèle k-ε)

1. Équation de continuité (Conservation de la masse)

L'équation de conservation de la masse pour un fluide compressible est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

Où $\vec{V} = (u, v, w)$ est le vecteur vitesse. Cette équation garantit que la masse est conservée dans le domaine fluide.

Ces équations signifient que la masse du fluide ne s'accumule pas dans le volume de contrôle : le débit entrant est exactement égal au débit sortant. Dans notre cas, cela implique que l'air qui entre dans la maison par les ouvertures doit être évacué pour garantir une circulation continue.

2. Équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes)

Les équations de Navier-Stokes sont issues de la seconde loi de Newton appliquée à un fluide. Elles expriment la conservation de la quantité de mouvement. Pour un fluide incompressible et newtonien :

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \partial_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i \quad (3)$$

Où :

u_i : composante de la vitesse dans la direction i (où $i=1,2,3 \rightarrow x,y,z$)

u_j : Composante de la vitesse dans la direction j

x_j : Coordonnée spatiale dans la direction j

p : pression

μ : viscosité dynamique

ρ : densité

ε : Taux de dissipation de l'énergie turbulente

g_i : Composante de l'accélération gravitationnelle dans la direction

Ces équations décrivent comment la vitesse de l'air évolue sous l'effet des gradients de pression, de la viscosité du fluide, et des forces extérieures. Elles sont résolues numériquement sur chaque cellule du maillage.

3. Équation de l'énergie

L'équation d'énergie permet de modéliser les transferts thermiques dans le fluide. Elle tient compte des effets de la convection (transport par le mouvement du fluide) et de la conduction (diffusion thermique). Elle s'écrit comme suit :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (4)$$

Où :

c_p Est la capacité calorifique à pression constante

K est la conductivité thermique

S_T Est une source thermique (éventuellement nulle).

Dans la maison bioclimatique, cette équation est essentielle pour prédire la distribution de température, notamment en fonction de l'ensoleillement, de l'isolation thermique, et de la ventilation.

4. Modélisation de la turbulence – Modèle

La turbulence est un phénomène complexe et tridimensionnel, caractérisé par des fluctuations rapides de la vitesse. Le modèle **k-ε standard** est un modèle de turbulence très utilisé en CFD, notamment pour les écoulements internes comme ceux rencontrés dans les bâtiments.

Il repose sur deux équations :

A. Équation pour l'énergie cinétique turbulente

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

B. Équation pour le taux de dissipation

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

Où :

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ est la viscosité turbulente

G_k est la production de k due au cisaillement,

$C_{1\epsilon}$ $C_{2\epsilon}$ σ_k σ_ϵ Sont des constantes empiriques

Valeurs typiques des constantes :

- $C_\mu = 0.09$
- $C_{1\epsilon} = 1.44$
- $C_{2\epsilon} = 1.92$
- $\sigma_k = 1.0$
- $\sigma_\epsilon = 1.3$

➤ Choix de modèle de turbulence

La modélisation de la turbulence est un aspect critique de la mécanique des fluides numérique (CFD) qui vise à prévoir le comportement des flux turbulents. Les modèles de turbulence sont essentiels pour concevoir des applications d'ingénierie efficaces et sûres, telles que l'interaction vent-structure pour le calcul des structures. Parmi les différentes approches de modélisation des turbulences, les trois modèles les plus répandus sont : RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et DDES (Delayed Detached Eddy Simulation). Chaque modèle a ses propres caractéristiques et applications.

➤ RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

L'approche RANS est l'une des méthodes les plus couramment utilisées dans la modélisation des turbulences. Il s'agit de la moyenne des équations de Navier-Stokes au cours du temps, ce qui lisse efficacement les fluctuations de la turbulence pour fournir une solution de flux stationnaire. Cette méthode simplifie considérablement les exigences de calcul et est particulièrement utile pour les applications où le flux est stationnaire ou légèrement transitoire. Les modèles RANS sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur robustesse et de leur faible coût de calcul. Cependant, ils peuvent être moins précis dans la projection des flux complexes avec une séparation importante ou une forte instabilité.

➤ **URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes)**

L'approche URANS est une extension de l'approche RANS, permettant des modifications en fonction du temps dans le champ d'écoulement, ce qui le rend capable de saisir les phénomènes de flux transitoire. Il utilise toujours la moyenne de Reynolds des équations de Navier-Stokes, mais ne calcule pas la moyenne du flux dans le temps aussi strictement que RANS. Cela signifie qu'URANS permet de modéliser des caractéristiques de flux transitoire à plus grande échelle et des comportements oscillants, typiques dans de nombreux systèmes d'ingénierie pratique, tels que le détachement tourbillonnaire des coins du bâtiment. Bien qu'URANS constitue une amélioration par rapport à RANS en termes de capture de l'instabilité, cette méthode utilise toujours des modèles de viscosité turbulente qui ne peuvent pas résoudre correctement les structures turbulentes plus fines.

➤ **DDES (Delayed Detached Eddy Simulation)**

DDES est une approche hybride combinant les méthodes RANS et la simulation des grandes structures de la turbulence (LES). Dans les zones du flux où la couche limite est fixée, la méthode DDES devient similaire à un modèle RANS, offrant ainsi une efficacité de calcul. Dans les régions où le flux se détache et où les structures turbulentes sont dominantes, la DDES passe à un mode de simulation des grandes structures de la turbulence, ce qui résout ces structures avec plus de précision. Cette méthode est particulièrement utile dans les flux complexes comprenant les zones de séparation des flux, de réassemblages et de sillage, tels que les bords et les coins de bâtiment. DDES offre un bon équilibre entre la coût de calcul et la précision, notamment dans la simulation des flux à nombre de Reynolds élevé avec des régions transitoires et séparées importantes.

Conclusion :

Le choix du modèle de turbulence dépend en grande partie des exigences spécifiques du problème, notamment les caractéristiques du flux, les besoins de précision et les ressources de calcul disponibles. Les modèles RANS sont adaptés aux flux plus simples et stationnaires, tandis qu'URANS permet une meilleure gestion des phénomènes de flux transitoire. La méthode DDES, bien que plus complexe à calculer que RANS ou URANS, offre une précision supérieure dans les cas de flux transitoires, complexes et séparés. Chacun de ces modèles a contribué de manière significative aux progrès des simulations de mécanique des fluides, permettant ainsi aux ingénieurs et aux chercheurs de développer des solutions technologiques plus efficaces et plus performantes. [46]

Nous avons choisi la méthode RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) car elle permet de modéliser les écoulements turbulents de manière efficace tout en réduisant le coût de calcul, ce qui la rend adaptée à notre étude.

IV. Hypothèses de modélisation

Dans le cadre de cette étude, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été adoptées :

- L'air est considéré comme un fluide incompressible et newtonien,
- L'écoulement est stationnaire (état permanent),
- L'écoulement est turbulent et tridimensionnel,
- La gravité est prise en compte pour simuler la convection naturelle,
- Les parois du bâtiment peuvent être adiabatiques ou à température imposée,
- Les effets de rayonnement sont négligés,
- Les conditions aux limites sont fixées selon la géométrie (infiltrations, ouvertures, coupoles, etc.).

V. Conclusion

La modélisation par la dynamique des fluides numérique (CFD) constitue un outil incontournable pour analyser et prédire le comportement de la ventilation naturelle dans les bâtiments. À travers la résolution des équations fondamentales – continuité, quantité de mouvement, énergie – et l'introduction d'un modèle de

turbulence, cette méthode permet d'obtenir une vision complète des phénomènes d'écoulement et de transfert thermique.

Les résultats issus de cette modélisation fourniront, dans le chapitre suivant, une base solide pour comparer différentes configurations architecturales et optimiser la performance énergétique et le confort thermique de la maison bioclimatique étudiée.

Chapitre IV :

Simulation Et Résultat

I. Logiciel de simulation GAMBIT

Le Gambit est un logiciel de maillage 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie de différentes formes d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers (.msh) pour Fluent. Ce dernier est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. Le Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.
- La définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.[46]

1. Maillage sous Gambit

Pour réaliser un maillage d'une forme géométrique dans le logiciel Gambit en effectuera les étapes suivantes :

A. Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant : `:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe`
Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers. `mesh . lok` dans le répertoire : `/Fluent.Inc/ntbin/ntx86` et relancez `Gambit.exe`.

B. Construction de la géométrie

Le but de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D. Pour effectuer une simulation par Gambit-Fluent il faut suivre une logique de calcul. Cette simulation faite à partir des processus avec une approche interactive, étape par étape. Cette logique est résumée dans l'organigramme suivant :

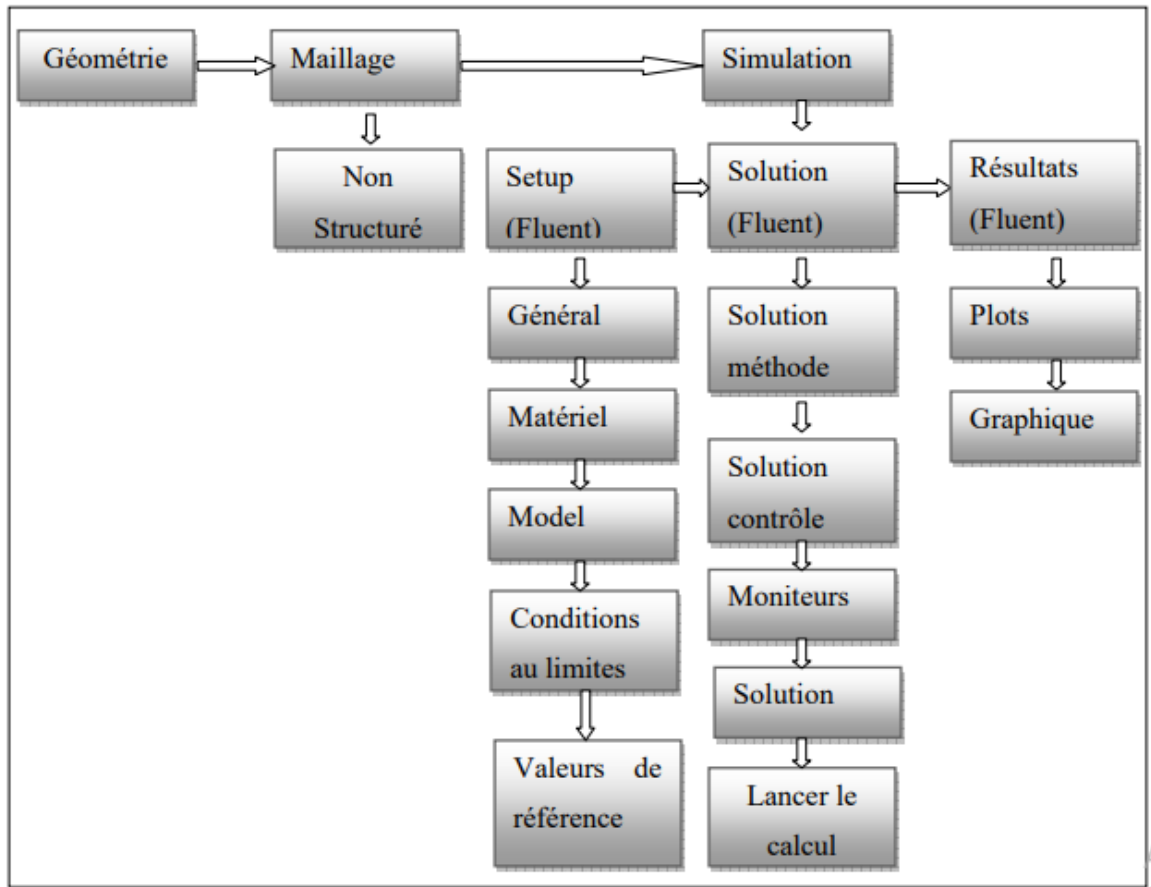


Figure 4.1 : "Processus CFD" pour la simulation numérique pour Gambit-Fluent.

C. Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

- **Choix du type de maillage**

Le nombre de cellules nécessaires pour résoudre un problème dépend de la précision attendue. Il est important que le maillage soit resserré dans toutes les zones où les variables présentent de forts gradients, en particulier au voisinage des parois. Afin de choisir un maillage optimal pour obtenir des résultats numériques acceptables. On fait varier le nombre de cellules et on observe l'évolution des résidus en fonction du nombre d'itérations

- **Différents types de maillage**

La méthode numérique des volumes finis est employée pour discrétiser le domaine physique et les différentes équations aux dérivées partielles tridimensionnelles des modèles mathématiques appliqués à l'écoulement considéré. Elle est basée sur l'intégration de ces équations sur des volumes finis obtenus par découpage du champ de l'écoulement suivant un maillage imposé par le logiciel Fluent. Selon la forme géométrique, il faut bien choisir une maille adaptable à la géométrie, les mailles utilisées par Fluent sont les suivant : [47]

- **Exemple des maillages utilisées en volume finis par Fluent**

- a) Maillage structuré (quadra/hexa)**

Le maillage structuré est un type de maillage dans lequel les cellules sont arrangées selon un schéma régulier et ordonné. Les nœuds sont organisés dans une grille (ou une matrice) et chaque cellule a un voisin défini par une position logique (i, j, k), ce qui simplifie le calcul des gradients et des flux. En 2D, les cellules sont des quadrilatères ; en 3D, elles sont des hexaèdres. [48]

Le maillage structuré offre une grille régulière, une connexion systématique entre les cellules, et une efficacité de traitement des données supérieure. Ces caractéristiques le rendent très adapté aux écoulements simples ou réguliers. [49]

Ses avantages sont les suivants :

- Haute précision numérique
- Temps de calcul réduit
- Contrôle facile de la densité du maillage
- Idéal pour les écoulements laminaires ou rectilignes [50]

Ses inconvénients sont :

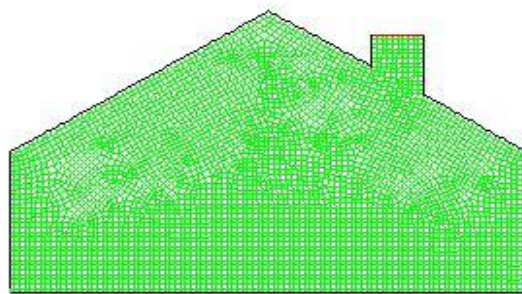
- Difficile à appliquer sur des géométries complexes
- Nécessite parfois un découpage du domaine en sous-zones
- Moins flexible que le maillage non structuré pour des modèles architecturaux réels.[51]

Un bon maillage structuré doit avoir :

- Orthogonalité élevée (angles proches de 90°)

- Aspect ratio raisonnable (proche de 1)
- Transitions douces dans la taille des cellules
- Alignement avec le flux principal.[52]

- **Exemple du maillage utilisé**



b) Maillage non structuré (tri/tétra.)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

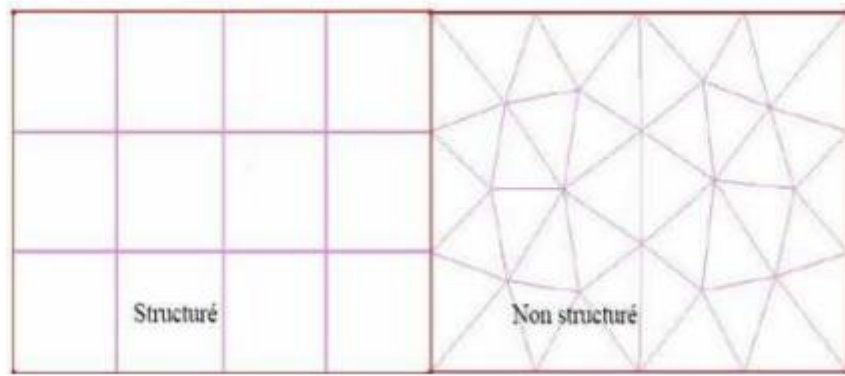


Figure 4.2 : *Types des maillages.*

c) Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

➤ Combinent entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré

- **Techniques générales de génération du maillage**

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne Qualité des éléments.
- Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

- **Qualité d'un maillage**

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. - Une bonne qualité de maillage repose sur : - Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ...etc.). Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

- **Lissage**

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

2. Logiciel de simulation FLUENT

A. Présentation de Fluent

Fluent est un programme informatique conçu pour simuler les écoulements de fluides.

Le sujet de cette étude est le phénomène de transfert de chaleur dans des géométries complexes.

Il a été démontré que le système offre un haut degré de flexibilité et d'adaptabilité, avec la capacité de répondre à un large éventail d'exigences.

Le maillage est affiné en fonction des conditions limites.

Les dimensions sont cohérentes et uniformes. C'est une considération particulièrement pertinente dans les régions caractérisées par des gradients importants.

Fluent est écrit en langage « C » et utilise toute la flexibilité et la puissance que ce langage peut offrir. L'affirmation suivante est faite :

L'architecture client-serveur est utilisée pour faciliter le calcul parallèle sur plusieurs machines. Le sujet a atteint un haut niveau de compétence dans le langage.

Le logiciel est équipé d'un outil graphique qui facilite l'affichage et le traitement des résultats.

On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme, et l'option (User Defin Fonction) UDF permet de résoudre des équations additionnelles ou des termes sources additionnels définis par l'utilisateur. Ainsi, à titre non exhaustif, il a les capacités de modélisation suivantes :

- Ecoulements 2D ou 3D
- Etats permanents ou transitoires

- Ecoulement incompressibles ou compressibles, non visqueux, laminaires ou turbulents, Newtonien ou non
- Transfer de chaleur, par conduction, par convection ou radiatif
- Les écoulements avec changements de phases
- Ecoulements en milieu poreux.

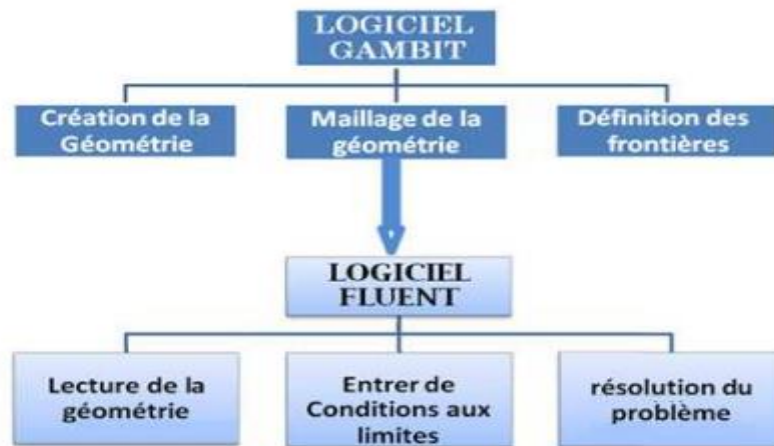


Figure 4.3 : Schéma générale qui représente la position du Fluent dans les étapes de calcul numérique [53]

Fluent est un code de calcul permettant de modéliser l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur dans ou autour de géométries complexes. Il a été démontré que le logiciel est capable de résoudre les problèmes de maillage non structuré découlant de géométries complexes avec un degré raisonnable de facilité. Les types de maillage pris en charge comprennent les maillages triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, les maillages tétraédriques, hexaédriques, pyramidaux et mixtes (hybrides) en 3D. Fluent prend en charge le langage de programmation « C », en tirant parti de sa flexibilité et de ses fonctionnalités, y compris l'allocation dynamique de la mémoire. Fluent est utilisé via une interface graphique. L'utilisateur avancé a la possibilité d'adapter ou d'augmenter l'interface selon ses besoins en écrivant des macros et des fonctions de menu pour automatiser certaines procédures.

B. Interface du code Fluent

On peut démarrer 4 versions de Fluent 2D, 3D, 2DDP, 3DDP ayant la même interface :

- 2D (2 Dimensions)
- 2DDP (2 Dimensions Double Précision) (l'utiliser dans notre travail)

- 3D (3 Dimensions)
- 3DDP(3 Dimensions double Précision)

Les fonctions disponibles dans la barre de menu de l'interface Fluent sont :

- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde, importation ...etc.
- **Grid** : pour la vérification et la manipulation du maillage et de géométrie.
- **Define** : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites.
- **Solve** : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul.
- **Adapte** : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres.
- **Surface** : pour créer des points, de lignes et des plans nécessaires à l'affichage des résultats.
- **Display et plot** : pour l'exploitation des résultats.
- **Report** : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité.
- **Parallèle** : pour le calcul parallèle.
- **Help** : pour l'exploitation du contenu du code.

C. Choix des paramètres de FLUENT

- **Simple précisions ou double précision**

FLUENT offre deux modes de calcul : le mode (double précision) et le mode (simple précision). Dans le mode (double précision) : les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant 64 bits, alors que le mode (simple précision) : utilise une représentation à 32 bits. L'autre, le mode (double précision) est préconisé, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates, comme dans le cas d'un canal très long et mince.

D. Choix des matériaux

Dans le cadre de cette étude, le bois a été choisi comme principal matériau de construction pour la maison bioclimatique. Ce choix repose sur ses excellentes propriétés thermiques, notamment sa faible conductivité thermique, qui se situe généralement entre 0,12 et 0,18 W/m·K. Cette caractéristique confère au bois une très bonne capacité d'isolation, limitant les pertes de chaleur en hiver et les gains thermiques en été. De plus, en tant que matériau naturel,

renouvelable et à faible impact environnemental, le bois s'intègre parfaitement dans une approche de construction durable et bioclimatique. Sa performance en matière de régulation thermique contribue également à maintenir une température intérieure plus stable, réduisant ainsi les besoins en ventilation forcée ou en climatisation.

Ses propriétés sont :

- Densité : $700 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
- C_p : $2310 \text{ (j/kg}\cdot\text{K)}$
- Conductivité thermique : $0.173 \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$

E. Schémas de discrétisation

Sous « FLUENT », les variables stockées au centre de la cellule doivent être interpolés aux faces du volume de contrôle. Il est possible de choisir entre différents schémas de discrétisation pour les termes convectifs des équations gouvernantes, alors que les termes visqueux sont automatiquement discrétisés au second ordre pour plus de précision. Il reste que la discrétisation au premier ordre procure une meilleure convergence, alors que le « Second Ordre Upwind Schème » est de rigueur pour les écoulements non alignés au maillage.

F. Choix du schéma d'interpolation de la pression

Dans la plupart des cas, le schéma « standard » est acceptable pour des écoulements spécifiques. On peut choisir parmi les options suivantes :

- Le schéma au « second ordre » est à utiliser pour l'écoulement compressible et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.
- Le schéma linéaire « linear » est disponibles comme alternative dans le cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.
- Le schéma presto

Le schéma "PRESTO" (pressure staggering option): est approprié pour les écoulements hautement tourbillonnaires, à grande vitesse de rotation ou les écoulements dans des domaines fortement courbés. Il utilise le bilan de masse dans un volume de contrôle décalé pour la face où est calculée la pression décalée. Ce schéma est inspiré de l'idée de la grille décalée valable avec un maillage structuré proposé par Patankar (1980).

G. Conditions aux limites

Le tableau suivant représente les types et les caractéristiques de différente zone

Tableau 4 : les paramètres de solveur (conditions aux limites)

Zone	Types	Caractéristiques
ouverture	Velocity inlet	0.5 m/s
Sortie de cheminé	Pressure outlet	-
Mur droite	wall	30 C°
Mur gauche	wall	70 C°
La toiture	wall	60 C°
La sol	wall	20 C°
Fenêtre	Pressure outlet	-

- **Paramètres de sous relaxation**

Le tableau suivant représenté les valeurs des différentes variables de sous relaxation :

Tableau 5 : les valeurs des différentes variables de sous relaxation

Variables	Valeur
Pression	0.3
Quantité de mouvement	0.7
Force de volume	1
Densité	1
Energie cinétique turbulent	0.8
Dissipation turbulent	0.8
Viscosité turbulent	1
Energie	1

Constant de gravité	9.81
---------------------	------

- **Algorithme de résolution :**

Le tableau 6 présente les différents modèles utilisés sous fluent

Tableau 6 : les différents modèles utilisés sous solveur fluent

Variables	Least squares cell based
Accouplement pression – vitesse	Simple
Gradient	based
Pression	presto
Quantité de mouvement	Second ordre upwind
Energie cinétique turbulent	Second ordre upwind
Dissipation turbulent	Second ordre upwind
Energie	Second ordre upwind

Tableau 6 : les différents modèles utilisés sous solveur fluent

H. Procédure de résolution

Après avoir vérifié le maillage de la géométrie en Gambit, on lance la lecture du fichier contenant l'extension.msh. La création du fichier de donné (extension.cas) est nécessaire en Fluent pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie ; puis on passe au type de solveur. Notre cas est tridimensionnel et l'écoulement est stationnaire. Les autres étapes définissent les choix du fluide, matériaux et les conditions aux limites. La dernière étape, c'est choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence ainsi que l'initialisation du calcul qui dépend des conditions aux limites. [54]

I. Contrôle de la solution (convergence)

Le logiciel fluent déclare la convergence dès que Tous les résidus calculés atteignent la valeur du critère de convergence introduit. Pour chaque paramètre individuel. Le tableau suivant contient les résidus comptés pour chaque équation :

Tableau 7 : Les résidus pour les différentes équations

équation	Quantité du mouvement selon x	Quantité du mouvement selon y	Equation de continuité	Equation de L'énergie	k	Epsilon ε
Résidu	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001

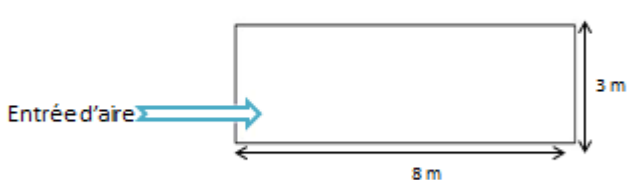
2

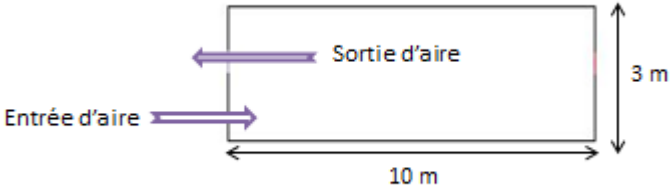
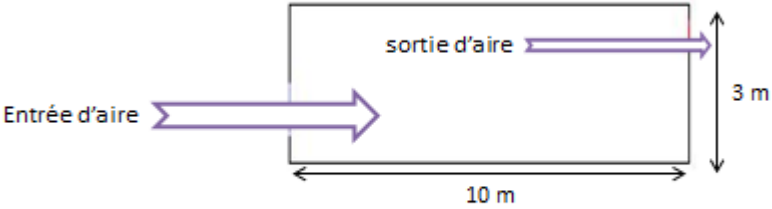
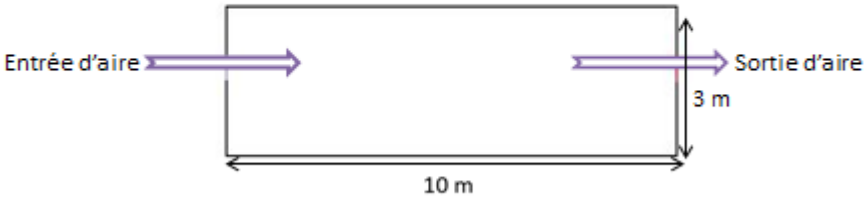
J. ETUDE DE CAS

Les cas étudiés se différencient par la position, la taille, le type d'ouvertures (fenêtre, cheminée, infiltration), ainsi que par la forme du toit. Trois critères ont été pris en compte pour l'évaluation :

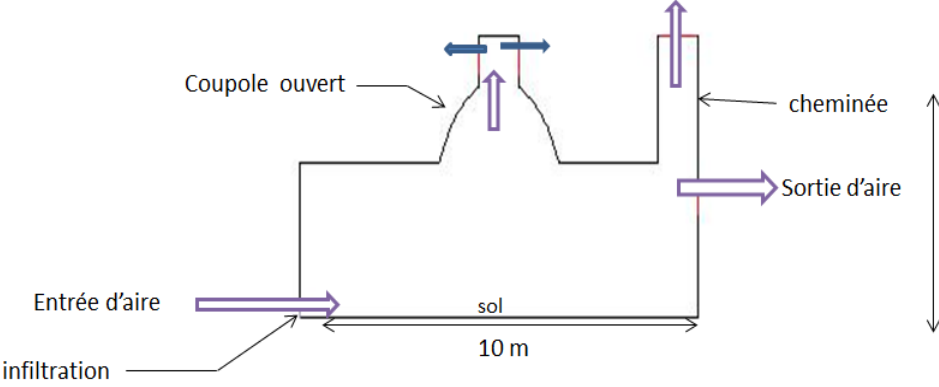
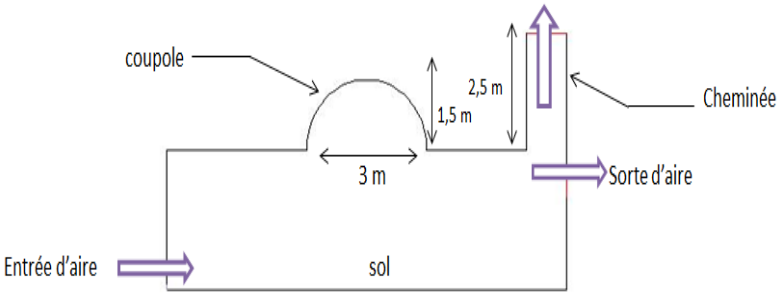
- Répartition de la pression
- Distribution de la vitesse
- Évolution de la température intérieure

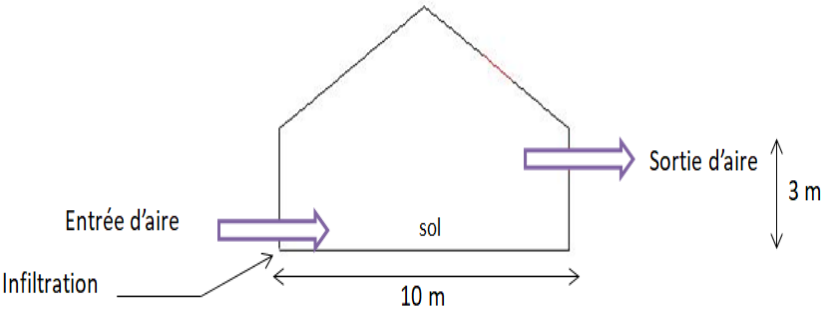
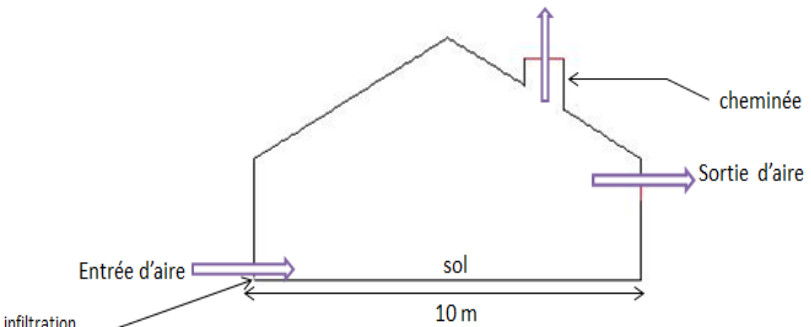
Tableau 8 : Tableau des cas

Ca s	Configuratio n	Schéma
1	-Chambre sans sortie -Hauteur 3m -Largeur 10m -Ouverture 0,5x1m sur le côté gauche -Forme rectangulaire	 Le schéma représente une chambre rectangulaire. Les dimensions sont indiquées : une largeur de 8 m et une hauteur de 3 m. Sur le côté gauche, une flèche bleue pointe vers l'intérieur de la chambre, accompagnée du texte 'Entrée d'air'.

2	-Deux fenêtres superposées (effet cheminée) 0,5x1m sur le côté gauche -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
3	-Deux fenêtres de tailles différentes 1.2x1m et 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
4	-Ventilation transversale (fenêtres opposées) 0,5x1m pour les deux -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
5	-Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m	

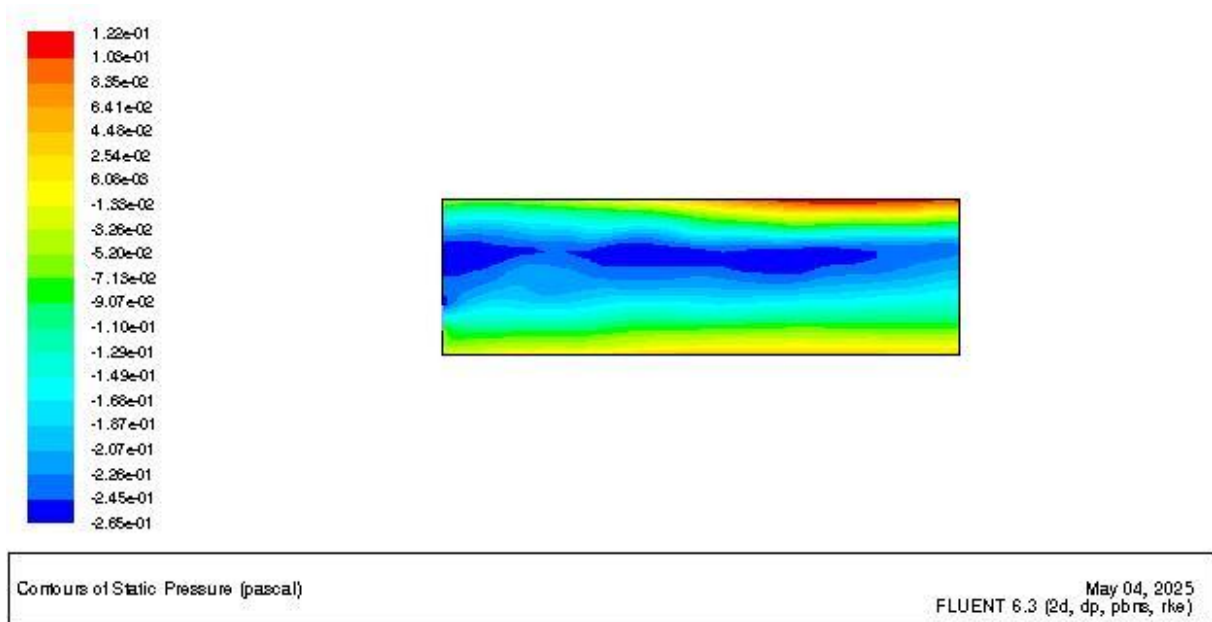
	-Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
6	-Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 5m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
7	-Coupole (sans cheminée) -Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	

8	-Coupole avec ouverture supérieure + cheminée 1.5m -Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
9	-Coupole fermée (sans ouverture en haut) 1.5m+ cheminée -Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	
10	-Toit à pignon -Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m	

	-Forme rectangulaire	
11	-Toit à pignon + cheminée -Infiltration basse de 0,1m + fenêtre droite de 0,5x1m -Hauteur 3m -Largeur 10m -Forme rectangulaire	

Cas 1 : Chambre sans sortie

➤ Pression :



L'absence de sortie d'air modifie fondamentalement la répartition de la pression à l'intérieur de la maison.

- Interprétation :

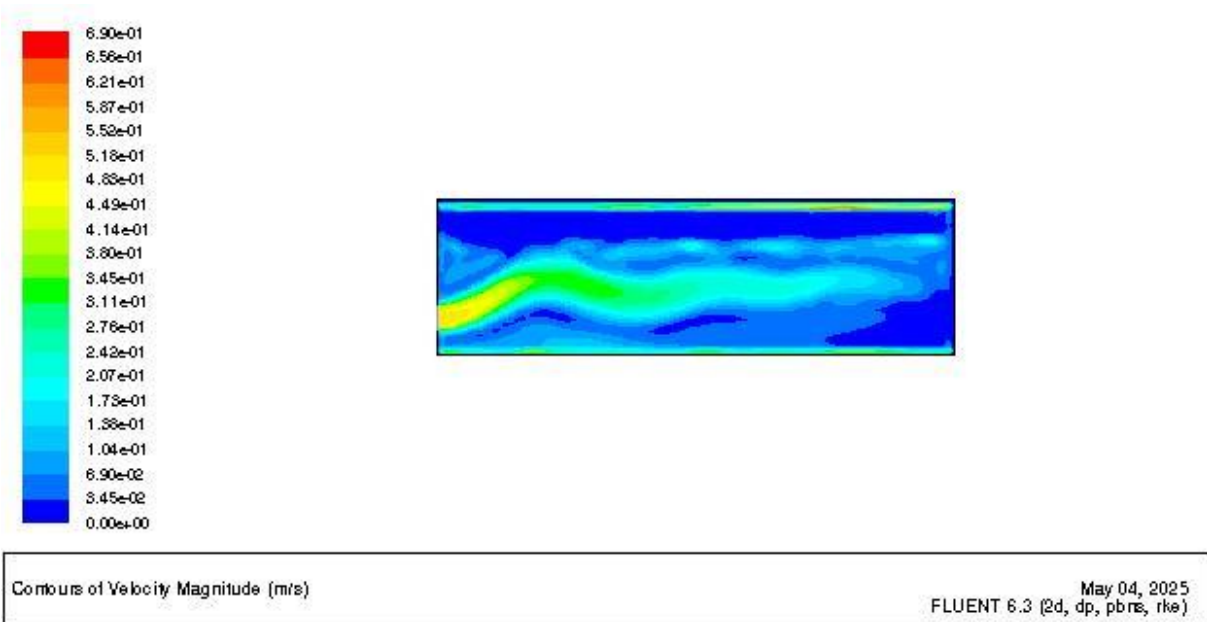
- Lorsque'il n'y a pas de sortie d'air, l'air qui entre par l'ouverture (fenêtre de 0,5 x 1 mètre sur le côté gauche) tend à s'accumuler, provoquant une augmentation de la pression interne par rapport à la pression extérieure.

- La pression est plus élevée à proximité de l'entrée d'air, où l'air s'engouffre, mais elle augmente également dans l'ensemble de la maison en raison de l'absence d'évacuation.

- Cette surpression peut ralentir l'entrée d'air au fur et à mesure que l'équilibre avec la pression extérieure est atteint, limitant ainsi la circulation de l'air.

- La répartition de la pression devient progressivement homogène à l'intérieur, avec une légère augmentation globale, tandis que les zones proches de l'ouverture subissent des variations plus marquées lors de l'entrée d'air.

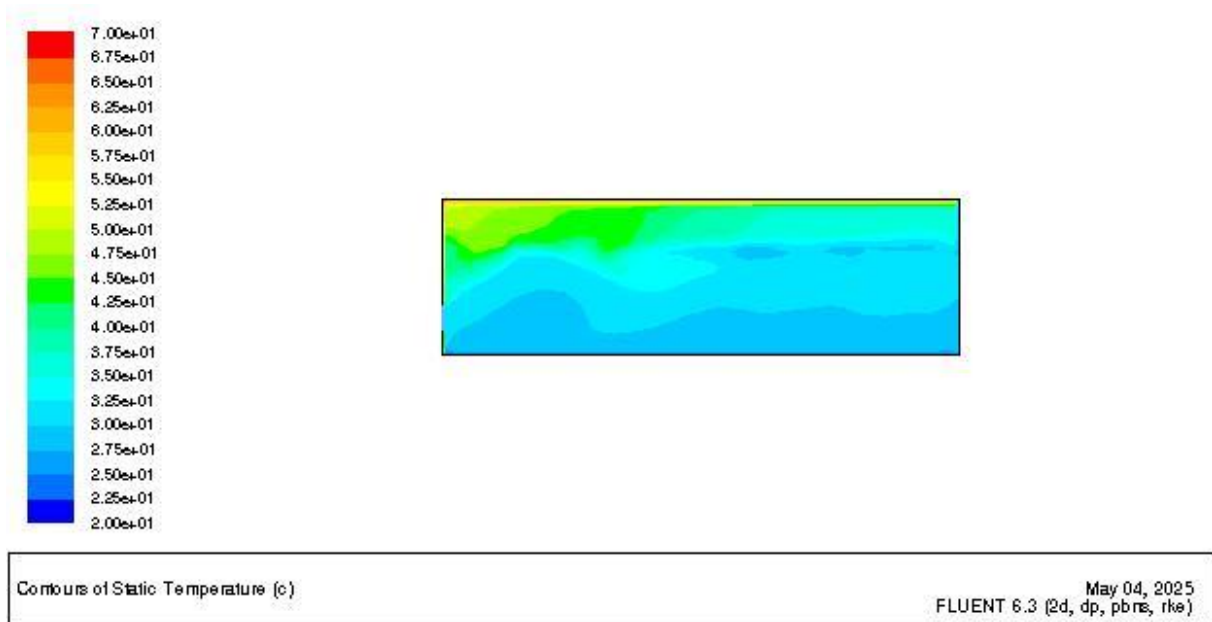
➤ **Vitesse :**



La dynamique de la vitesse est également perturbée en raison de l'absence de sortie.

- Interprétation :
- À proximité de l'ouverture, la vitesse de l'air est maximale car l'air s'engouffre sous l'effet de la différence de pression avec l'extérieur.
- Toutefois, dès que l'air pénètre dans la maison, sa vitesse chute rapidement en raison de l'accumulation d'air et de la résistance offerte par l'air déjà présent.
- Sans issue pour l'air, des mouvements de convection interne peuvent se produire, mais ils restent limités et localisés, surtout si l'air se réchauffe en intérieur.
- L'air circule en boucles ou tourbillonne autour des obstacles intérieurs, mais ces mouvements sont de faible intensité, l'air entrant finissant par se stabiliser.
- L'absence de flux de sortie crée des poches d'air stagnantes, notamment aux endroits les plus éloignés de l'entrée.

Température :



La température intérieure est fortement influencée par le manque de renouvellement d'air.

- Interprétation :

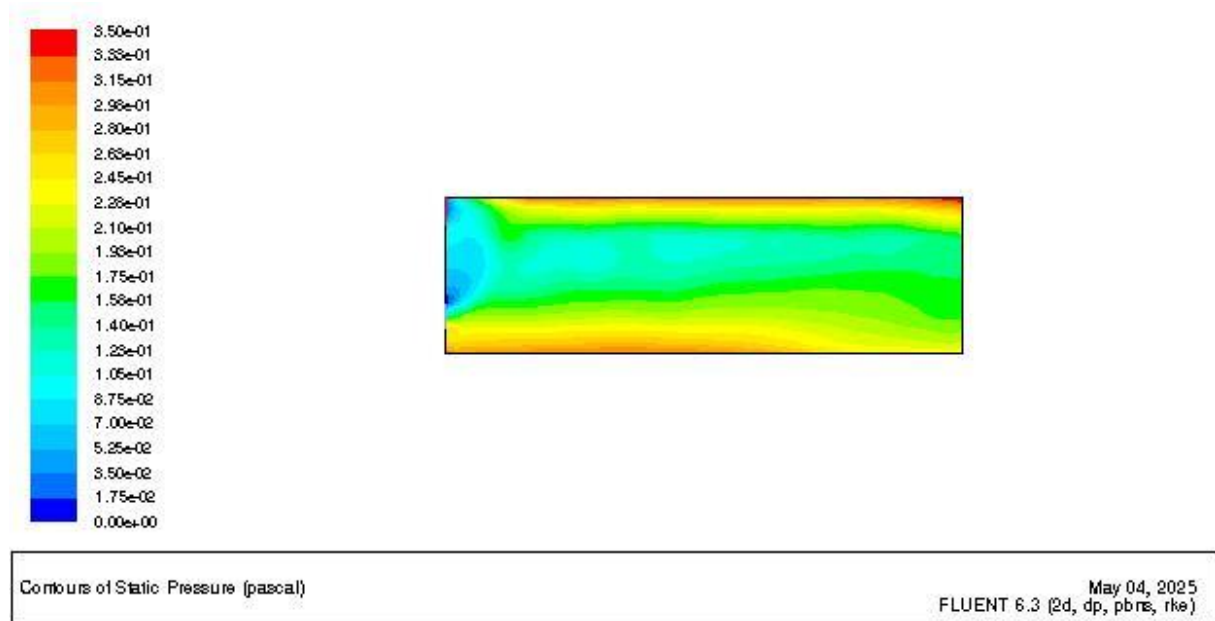
- L'air entrant est généralement plus frais que l'air intérieur. Cependant, une fois à l'intérieur, l'absence de sortie empêche l'évacuation de l'air réchauffé.
- La température augmente progressivement, notamment si des sources internes (rayonnement solaire, appareils) contribuent au réchauffement de l'air.
- La stratification thermique devient marquée : l'air chaud s'accumule en hauteur tandis que l'air frais, plus dense, reste au sol.
- En l'absence d'un flux continu d'air, la chaleur tend à s'accumuler dans la partie supérieure de la maison, augmentant le risque de surchauffe.
- Les zones proches de l'ouverture peuvent être légèrement plus fraîches si l'air extérieur est plus froid, mais cet effet est localisé.

- Conclusion :

L'absence de sortie d'air empêche la mise en place d'un flux d'air efficace et conduit à une accumulation progressive de pression et de chaleur. La vitesse est élevée uniquement au niveau de l'entrée, mais elle chute rapidement à l'intérieur. La température intérieure augmente au fil du temps, surtout en présence de sources de chaleur, avec une stratification thermique marquée.

Cas 2 : Deux fenêtres superposées (effet cheminée)

➤ Pression :



La présence de deux ouvertures sur le même mur crée une dynamique de pression plus complexe que dans le premier cas.

• Interprétation :

- L'air entre par la fenêtre située en bas sous l'effet de la différence de pression avec l'extérieur. La pression est plus élevée à proximité de cette ouverture d'entrée.

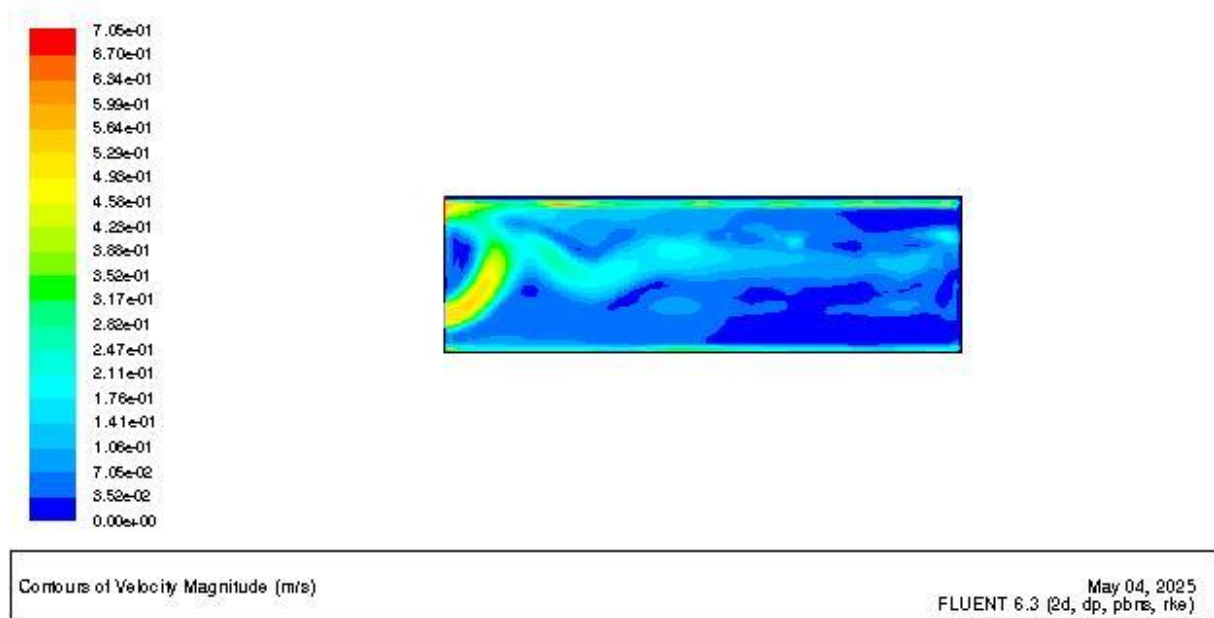
- La fenêtre située en haut agit comme une potentielle sortie passive, en raison de l'effet de convection naturelle : l'air chaud, moins dense, monte et cherche à s'échapper par l'ouverture supérieure.

- La pression près de la fenêtre haute est plus faible que près de la fenêtre basse, surtout si la température intérieure est supérieure à celle de l'extérieur.

- La différence de hauteur entre les deux ouvertures crée une pression hydrostatique naturelle, favorisant le déplacement de l'air chaud vers le haut.

- Le gradient de pression entre les deux ouvertures entraîne une circulation ascendante de l'air, favorisée par la différence de température et la stratification thermique.

➤ Vitesse :



La vitesse de l'air est influencée par le mouvement ascendant induit par la convection naturelle.

- Interprétation :

- À l'entrée inférieure, la vitesse est élevée en raison de la pression dynamique créée par l'air extérieur pénétrant dans la maison.

- Une fois à l'intérieur, l'air frais monte progressivement en se réchauffant, ce qui réduit légèrement sa vitesse.

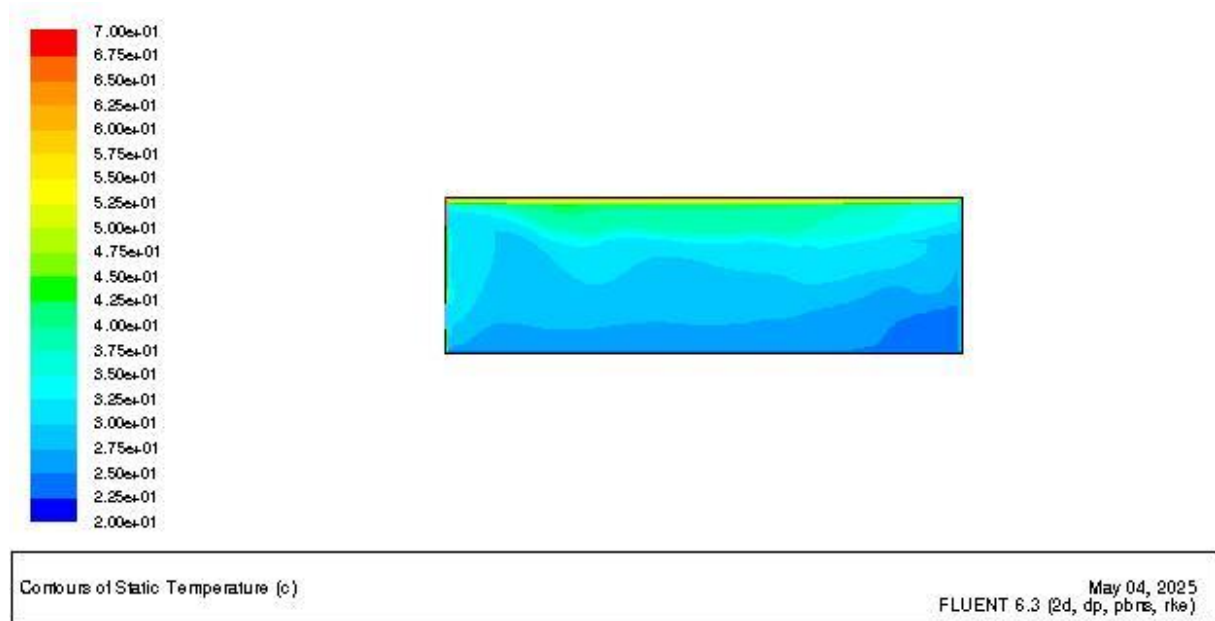
- À mesure que l'air chaud monte vers la fenêtre supérieure, la vitesse augmente de nouveau, atteignant un pic à proximité de l'ouverture haute si l'effet de tirage thermique est fort.

- La différence de hauteur entre les ouvertures crée un effet cheminé, amplifiant la vitesse ascensionnelle dans la maison.

- Des turbulences peuvent se former en raison des interactions entre l'air frais entrant et l'air chaud montant, notamment dans la zone centrale où les flux se croisent.

- La distribution verticale de la vitesse est donc marquée, avec une vitesse plus faible au sol et plus élevée en partie haute.

➤ **Température :**



La stratification thermique est marquée par la disposition verticale des ouvertures.

- **Interprétation :**

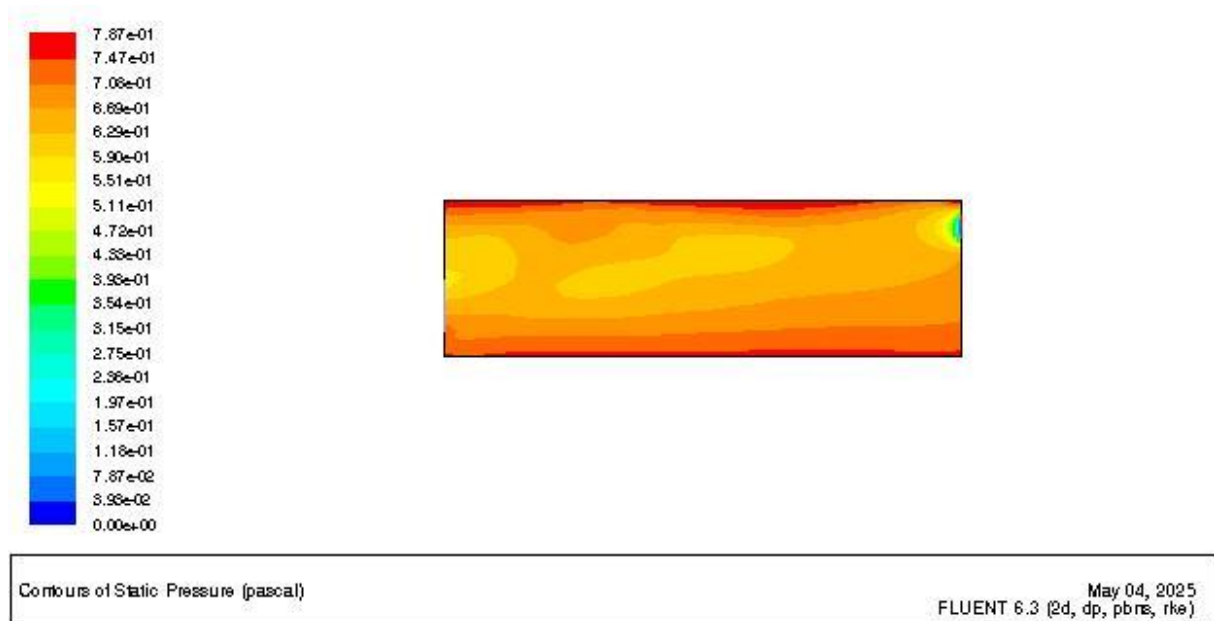
- L'air entrant par la fenêtre basse est généralement plus frais. En progressant à l'intérieur, il capte la chaleur des surfaces et des occupants, augmentant ainsi sa température.
- En raison de la convection naturelle, l'air chaud monte vers la fenêtre supérieure, créant une zone chaude en hauteur et une zone plus fraîche au sol.
- L'effet de cheminée provoqué par la configuration des ouvertures accentue cette stratification thermique, avec une répartition verticale bien définie.
- Près de la fenêtre haute, la température est la plus élevée, surtout si la maison est exposée aux rayonnements solaires.
- La circulation d'air continue permet toutefois d'évacuer l'excès de chaleur par la fenêtre supérieure, améliorant ainsi le confort thermique à hauteur d'occupant.

- Conclusion :

La configuration avec deux ouvertures sur le même mur (basse et haute) favorise une ventilation naturelle efficace par convection. La pression est élevée près de l'entrée basse et diminue en hauteur. La vitesse de l'air est influencée par l'effet de cheminée, avec un flux ascendant dominant. La température intérieure est stratifiée, avec un air plus frais en bas et plus chaud en haut, favorisant le renouvellement de l'air chaud.

Cas 3 : Deux fenêtres de tailles différentes

➤ Pression :



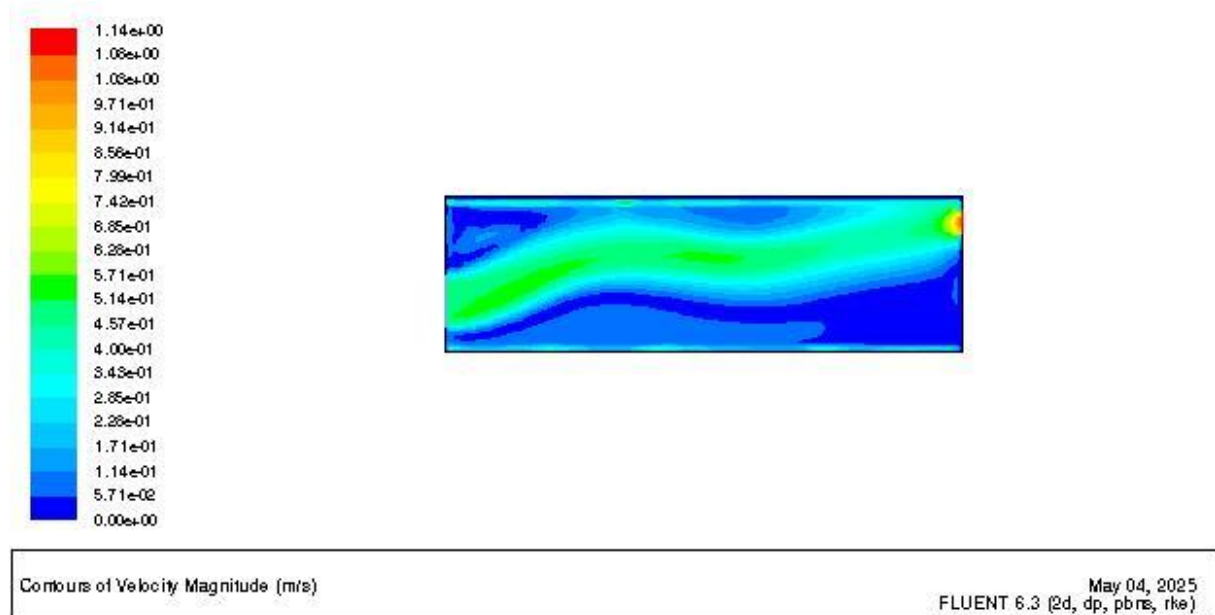
La disposition asymétrique des ouvertures crée une dynamique de pression spécifique.

- Interprétation :

- La grande fenêtre à gauche sert d'entrée d'air, créant une zone de haute pression à proximité en raison de l'afflux d'air extérieur.
- La petite fenêtre en hauteur, située à droite, agit comme une sortie d'air plus restreinte, induisant une légère dépression dans cette zone par rapport à l'entrée.

- La différence de taille entre les ouvertures crée un déséquilibre de pression : la fenêtre plus grande laisse entrer un volume d'air plus important que celui qui peut s'échapper par la petite ouverture.
- La répartition de la pression à l'intérieur est donc caractérisée par une pression plus forte du côté gauche, près de l'entrée, et une pression plus faible en partie haute à droite.
- Ce gradient de pression favorise un déplacement d'air diagonal dans la maison, de l'entrée vers la sortie, avec une montée progressive de l'air chaud vers la fenêtre haute.

➤ **Vitesse :**



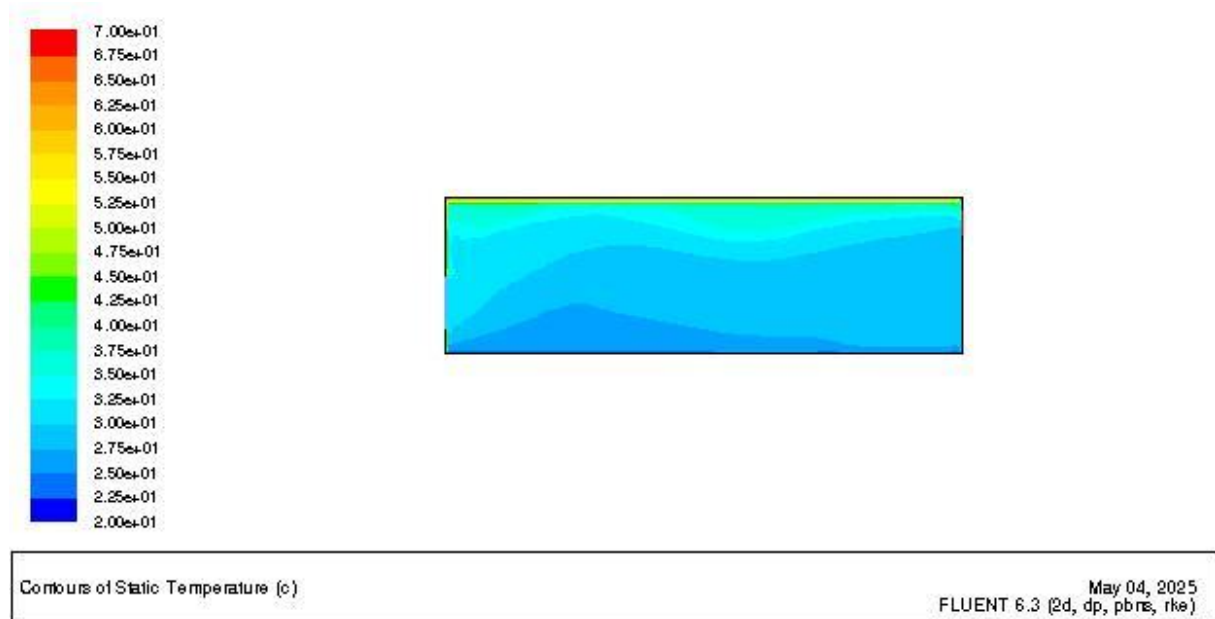
La vitesse de l'air dépend de la taille des ouvertures et de la différence de pression générée.

• **Interprétation :**

- À l'entrée (grande fenêtre à gauche), la vitesse de l'air est relativement élevée, car la large ouverture permet à un flux important de pénétrer.
- Une fois à l'intérieur, l'air perd de la vitesse en raison de la dissipation d'énergie cinétique et de la résistance rencontrée, mais conserve une composante horizontale importante.
- En s'approchant de la petite fenêtre en hauteur (côté droit), la vitesse augmente de nouveau localement, car l'air chaud se dirige vers la sortie plus étroite sous l'effet de la convection.

- La différence de hauteur entre les ouvertures crée un courant d'air ascendant, avec une accélération verticale notable près de la sortie.
- La distribution de la vitesse est donc diagonale : de gauche (entrée) à droite (sortie) avec une composante ascendante, favorisée par la disposition des fenêtres.
- La ventilation est plus efficace que dans les cas précédents, car la grande fenêtre permet un apport massif d'air, tandis que la petite ouverture en hauteur agit comme une évacuation naturelle.

➤ Température :



La différence de taille et de position des ouvertures influence fortement la répartition thermique.

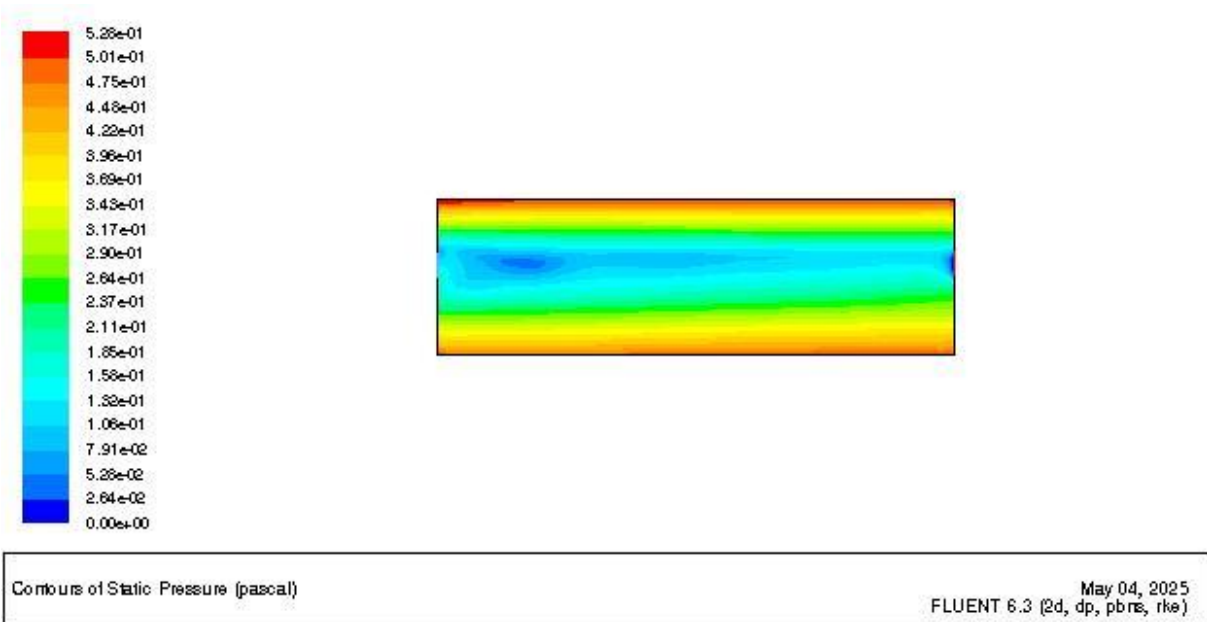
- Interprétation :
- L'air frais entrant par la grande fenêtre se diffuse horizontalement avant de monter progressivement en se réchauffant.

- La convection thermique est plus marquée que dans les cas précédents en raison de la configuration diagonale des ouvertures : l'air chaud est naturellement attiré vers la petite fenêtre en hauteur.
- Une stratification thermique se développe, avec des températures plus basses près de l'entrée et plus élevées près de la sortie.
- La grande entrée d'air permet de maintenir une température plus modérée à proximité de la fenêtre gauche, tandis que la chaleur s'accumule en hauteur à droite.
- La sortie plus petite limite l'évacuation rapide de la chaleur, ce qui peut entraîner une légère surchauffe en hauteur si l'apport d'air chaud est continu.
- Conclusion :

La configuration avec une grande fenêtre d'entrée à gauche et une petite fenêtre de sortie en hauteur à droite favorise un flux diagonal ascendant, soutenu par la convection thermique. La pression est plus élevée près de l'entrée et diminue en hauteur. La vitesse est importante à l'entrée et à la sortie, avec un déplacement diagonal. La température est plus faible à l'entrée et augmente en se rapprochant de la sortie haute, avec un risque de surchauffe en partie supérieure

Cas 4 : Ventilation transversale (fenêtres opposées)

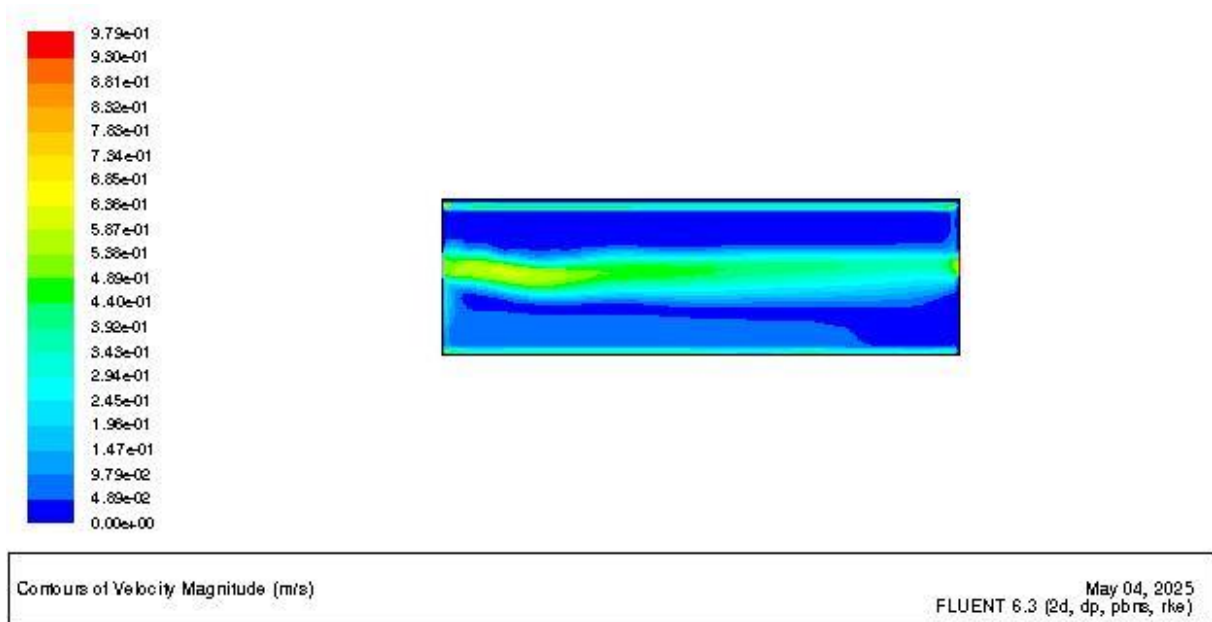
➤ **Pression :**



La configuration asymétrique des ouvertures, avec une grande fenêtre d'entrée située à gauche et une petite ouverture de sortie en hauteur à droite, génère une distribution de pression caractéristique des systèmes de ventilation naturelle.

- Interprétation :
- La fenêtre d'entrée permet une admission d'air importante, créant ainsi une zone de haute pression statique à proximité immédiate.
- À l'opposé, la petite ouverture haute agit comme un exutoire thermique, où l'air s'échappe sous l'effet combiné de la convection thermique et d'un gradient de pression.
- Ce déséquilibre entre les deux ouvertures induit un gradient de pression horizontal et vertical, responsable d'un écoulement naturel de l'air à travers la pièce.
- Ce gradient favorise un flux diagonal ascendant, car l'air a tendance à se déplacer de la zone à haute pression (entrée) vers celle à basse pression (sortie), tout en s'élevant sous l'effet de la chaleur accumulée.

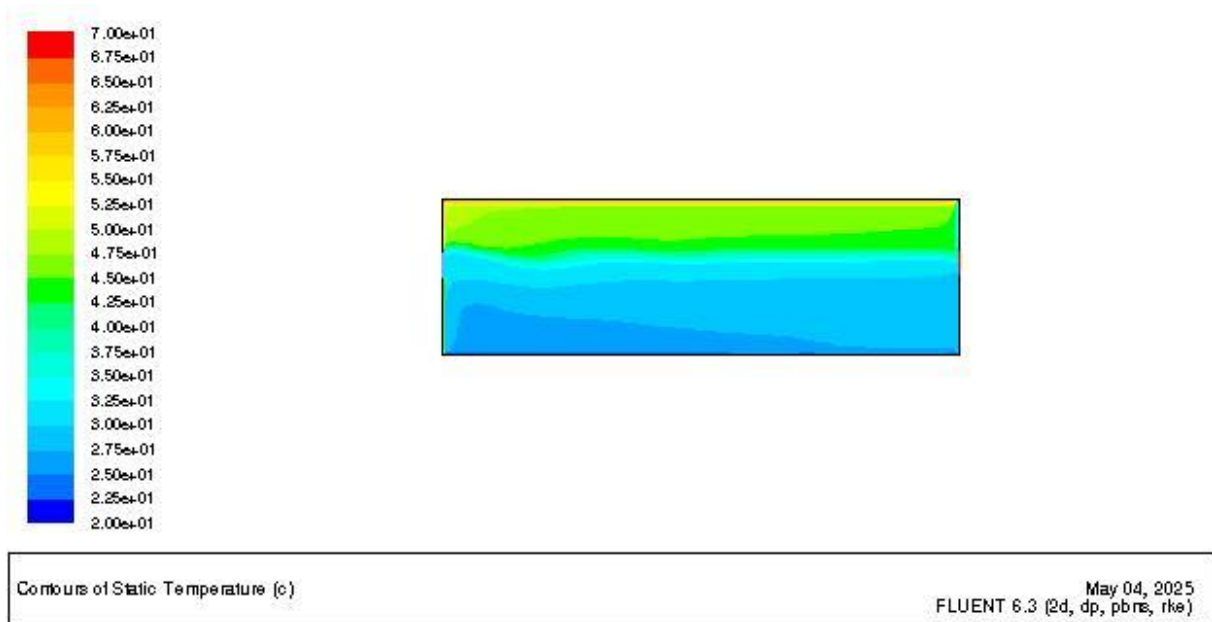
➤ Vitesse :



La vitesse de l'air est gouvernée par la géométrie des ouvertures et la dynamique des flux internes générés par la ventilation naturelle.

- Interprétation :
- À l'entrée gauche, l'air pénètre à vitesse relativement élevée, accentuée par la grande surface de l'ouverture qui diminue les pertes de charge locales.
- À l'intérieur, une décélération partielle se produit en raison de la dissipation visqueuse, mais la vitesse reste significative dans l'axe horizontal central.
- En s'approchant de la petite ouverture en hauteur à droite, la vitesse augmente de nouveau localement, conséquence d'un effet Venturi dû à la restriction du passage et à l'aspiration thermique verticale.
- La composante verticale devient prédominante près de la sortie, avec une accélération ascendante du flux d'air chaud, typique du mécanisme de tirage thermique.
- Cette configuration favorise un écoulement oblique, plus efficace que les circulations strictement horizontales, car elle combine convection naturelle et pression dynamique.

➤ Température :



La distribution de température est un indicateur clé de l'efficacité du système de ventilation passive, notamment en climat chaud.

- Interprétation :

- L'air frais, plus dense, pénètre par la grande ouverture et refroidit la zone basse à proximité immédiate.

- En progressant dans le volume intérieur, l'air s'échauffe au contact des parois ou du mobilier, puis monte naturellement vers la petite ouverture haute.

- Ce phénomène induit une stratification thermique verticale, avec des températures plus faibles en bas à gauche et des valeurs plus élevées en haut à droite, typique d'un système de convection naturelle libre.

- La configuration diagonale optimise l'effet de tirage thermique, mais la taille réduite de l'ouverture de sortie peut générer un ralentissement de l'évacuation de la chaleur, causant une accumulation thermique en partie haute.

- Un tel phénomène, s'il n'est pas maîtrisé, pourrait conduire à une surchauffe localisée, particulièrement en été.

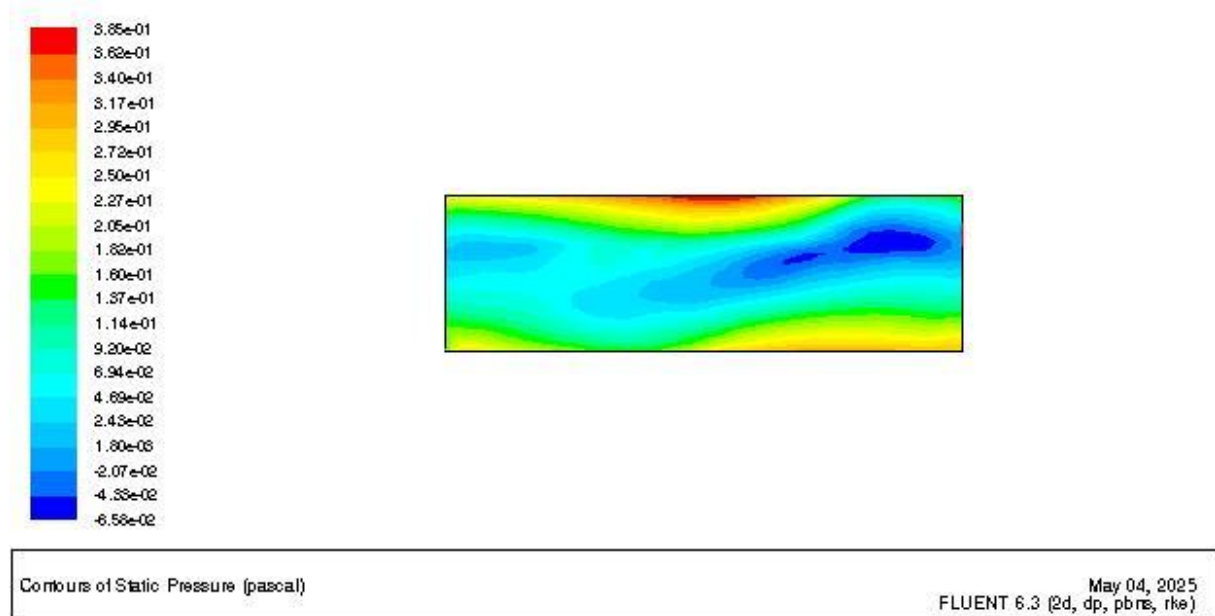
- Conclusion :

La simulation montre clairement que cette disposition asymétrique :

- Crée un gradient de pression stable, moteur du flux d'air.
- Favorise un écoulement diagonale ascendant, plus efficace en termes de renouvellement d'air.
- Optimise la ventilation thermique, en exploitant à la fois la pression dynamique d'entrée et la convection naturelle en sortie.
- Présente toutefois un risque de stagnation thermique si la sortie est trop petite ou obstruée, suggérant la nécessité d'un ajustement dimensionnel des ouvertures pour un équilibre optimal.

Cas 5 : Infiltration basse + fenêtre droite

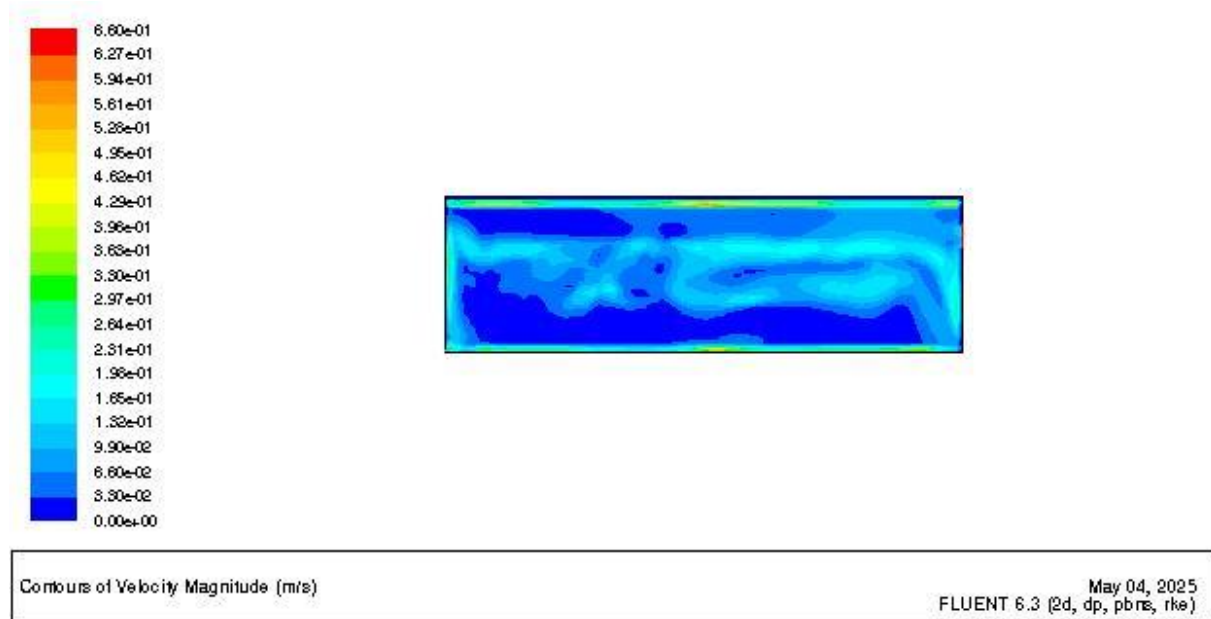
➤ Pression :



- Interprétation :
- L'air pénètre dans la maison par une fente basse de 0,1 m sur le mur gauche, ce qui génère une zone localisée de surpression très réduite.
- Cette petite ouverture limite le débit d'entrée et donc la génération d'une pression dynamique significative.
- La fenêtre de sortie à droite permet l'évacuation de l'air, ce qui induit une dépression locale à cet endroit, mais moins marquée que dans le Cas 4 à cause du débit plus faible.

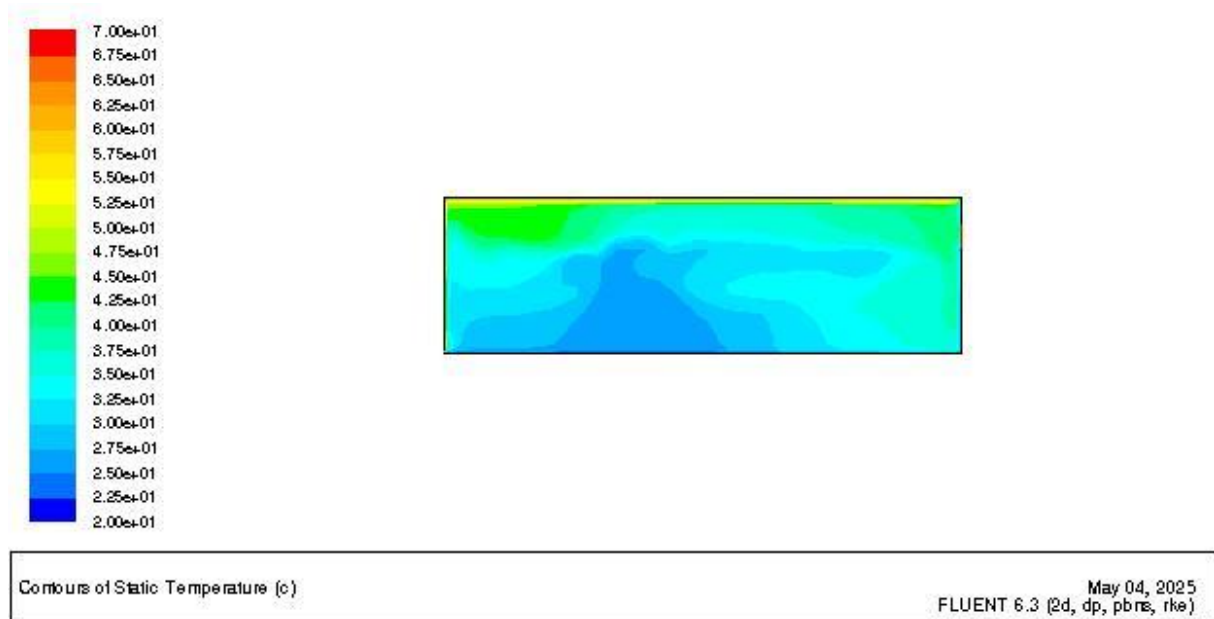
- La répartition de la pression reste donc modérée et faiblement différenciée, avec une pression légèrement supérieure à gauche (entrée) et plus basse à droite (sortie).
- La faible hauteur du bâtiment (3 m) limite l'effet de tirage thermique naturel : la différence de pression verticale entre bas et haut est insuffisante pour créer un effet de cheminée efficace.

➤ **Vitesse :**



- **Interprétation :**
- À l'infiltration (gauche bas), la vitesse est très faible, car l'ouverture est étroite et ne permet qu'un débit limité.
- L'air s'écoule horizontalement dans la maison avec une vitesse réduite, le mouvement étant principalement induit par le léger gradient de pression entre les ouvertures.
- Une accélération locale est observée à proximité de la fenêtre de sortie, en raison du resserrement de la section et de la légère aspiration thermique.
- Cependant, la basse hauteur de la pièce n'autorise pas un développement vertical du flux : l'écoulement reste quasiment horizontal, ce qui réduit l'efficacité de la ventilation thermique passive.

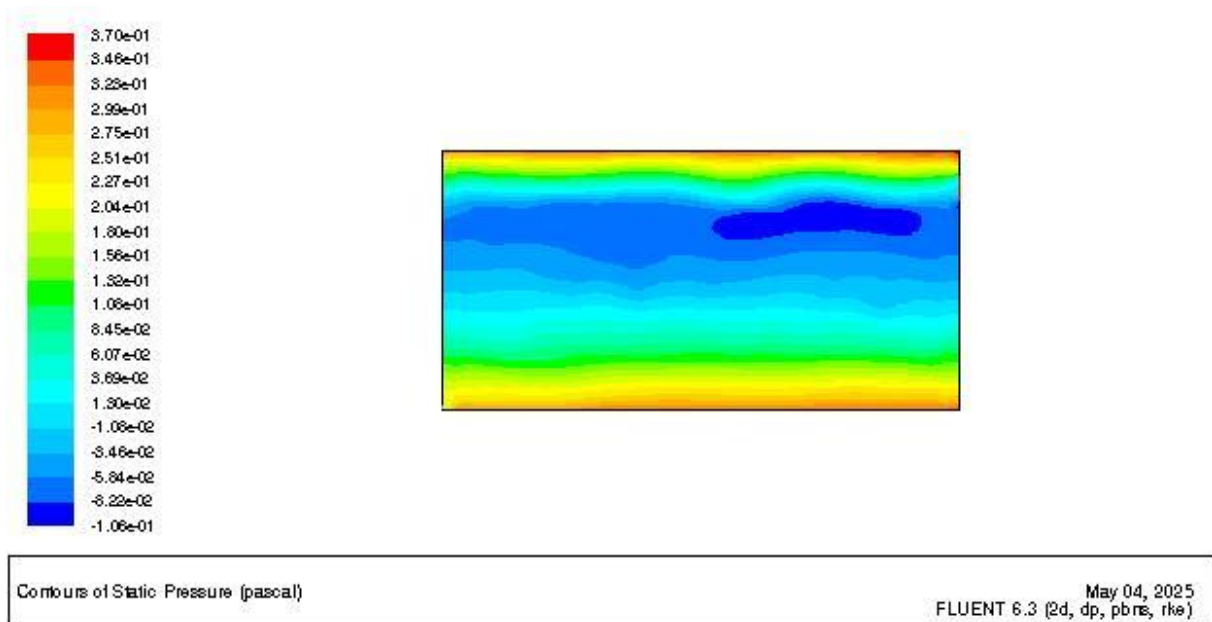
➤ Température :



- Interprétation :
- L'air frais entre à basse température par l'infiltration, mais en petite quantité.
- À cause de la vitesse réduite, la diffusion thermique est lente, ce qui provoque une accumulation de chaleur à l'intérieur.
- La stratification verticale est faible, car la faible hauteur limite la formation d'un gradient thermique vertical.
- Le refroidissement passif est donc limité, et la température moyenne dans la pièce reste relativement élevée, surtout si la chaleur interne (par les parois, l'ensoleillement ou les occupants) est importante.

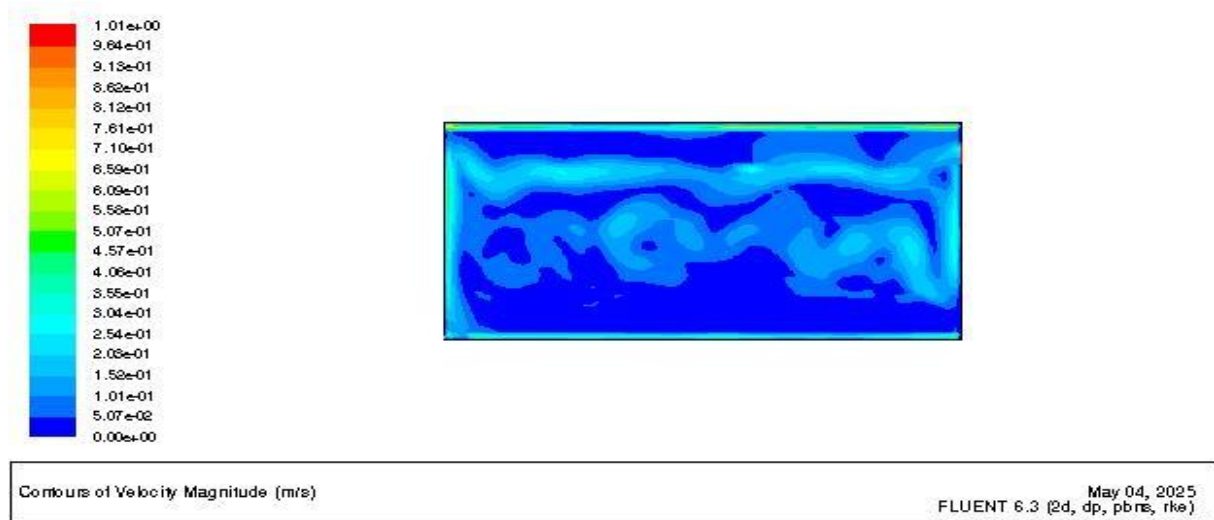
Cas 6 : Même cas que 5, avec hauteur de 5 m

➤ Pression :



- Interprétation :
- L'entrée d'air par infiltration génère toujours une surpression locale faible à gauche bas.
- Toutefois, la grande hauteur du bâtiment (5 m) permet l'établissement d'un gradient de pression vertical plus important, ce qui amplifie le tirage thermique.
- La chaleur s'accumulant en haut de la pièce entraîne une dépression plus marquée au niveau de la sortie (fenêtre droite), surtout si celle-ci est située en hauteur.
- Ce différentiel de pression vertical, absent ou faible dans le Cas 5, devient ici un moteur actif de la ventilation naturelle.

➤ Vitesse :



• Interprétation :

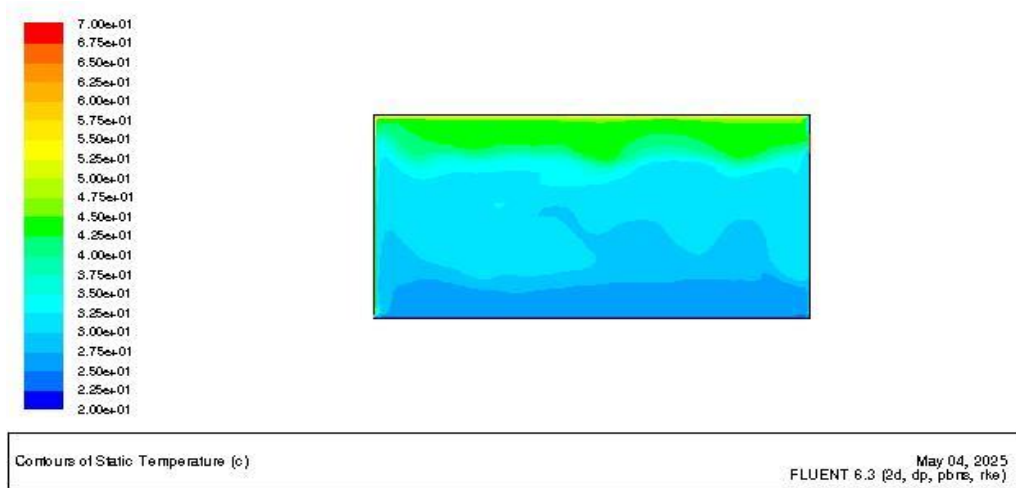
• L'air entre toujours lentement par l'infiltration basse, mais le gradient de température accru avec la hauteur génère une convection naturelle plus forte.

• On observe une composante verticale ascendante plus marquée dans l'espace intérieur, l'air chaud montant naturellement vers le haut du volume.

• Le flux global suit un mouvement convectif en boucle : entrée basse, montée verticale, sortie à droite en hauteur.

• La vitesse moyenne du flux d'air est donc plus élevée qu'en Cas 5, particulièrement dans la partie supérieure du volume.

➤ Température :



- Interprétation :

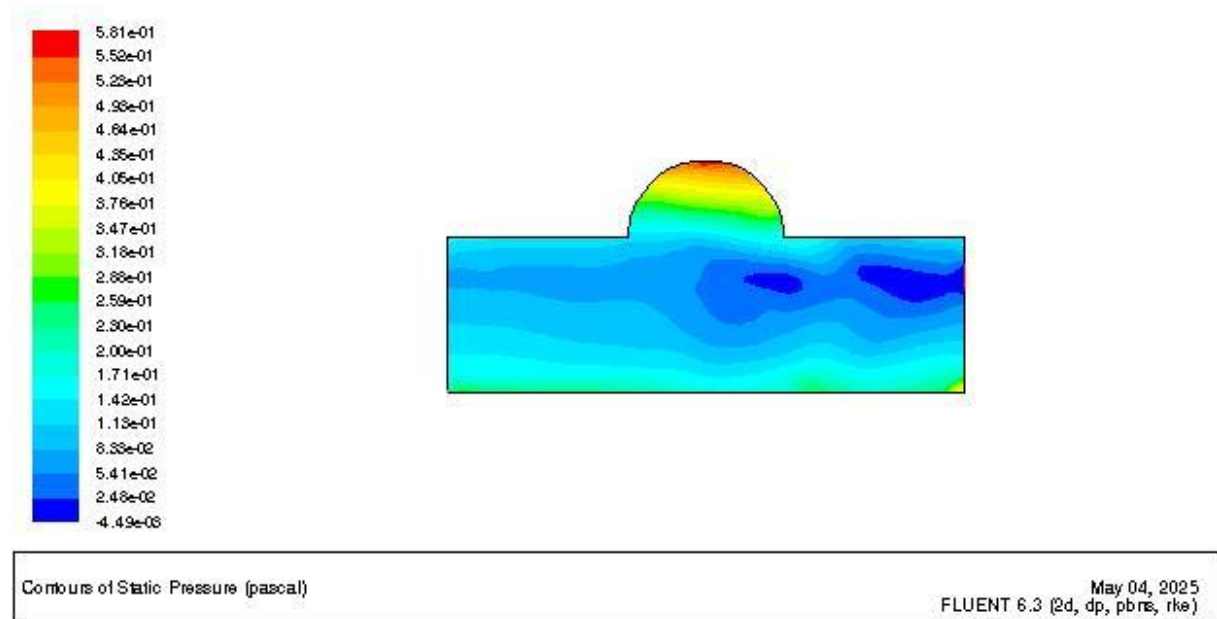
- L'entrée d'air frais contribue au rafraîchissement de la zone basse, comme en Cas 5.
- La hauteur accrue permet une stratification thermique plus prononcée : l'air chaud monte, l'air plus frais reste en bas.
- Cela permet une meilleure régulation thermique de la zone occupée (0–2 m du sol), avec une extraction plus efficace de la chaleur accumulée en hauteur.
- La température en haut du volume peut rester élevée si la chaleur interne est importante, mais l'évacuation par convection naturelle est facilitée.

La hauteur du bâtiment a un impact direct sur l'efficacité de la ventilation naturelle :

- Une hauteur plus importante améliore le tirage thermique, ce qui renforce le renouvellement d'air et favorise un meilleur confort thermique.

Cas 7 : Coupole (sans cheminée)

➤ Pression :

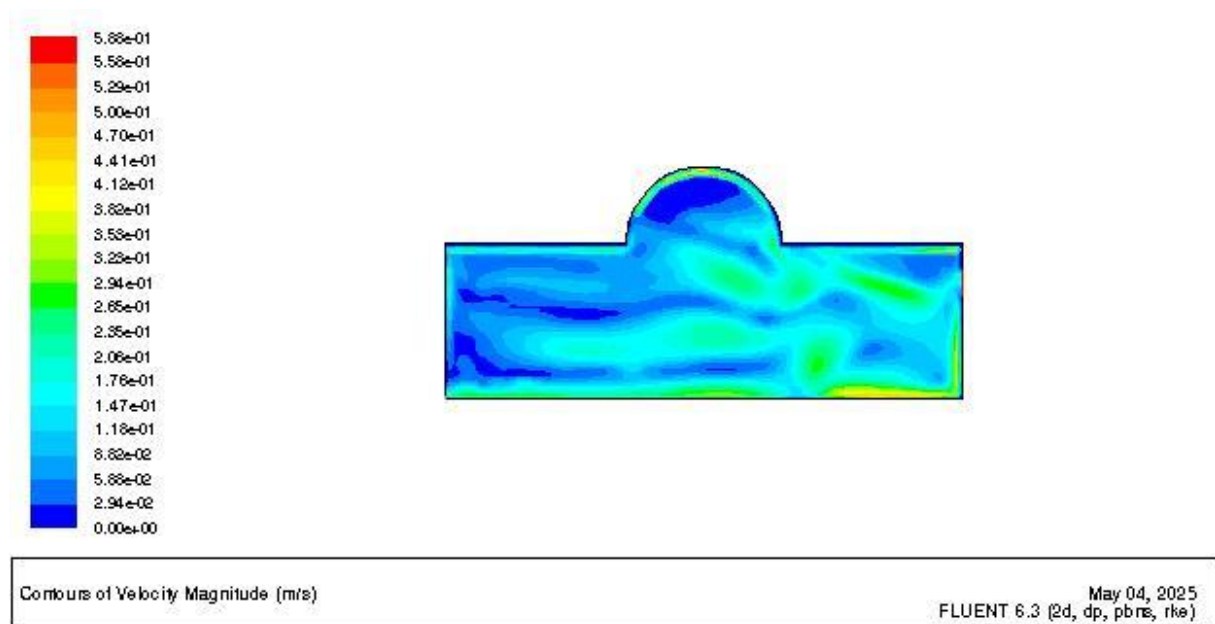


L'ajout d'une coupole modifie la distribution de la pression dans la maison. L'air entre par l'ouverture latérale gauche et peut s'évacuer par la fenêtre à droite, ce qui favorise un écoulement traversant.

- Interprétation :

- La pression est plus élevée à proximité de l'entrée d'air (à gauche), et plus basse à proximité de la fenêtre (à droite), créant un gradient de pression favorable à l'écoulement.
- La présence de la coupole en hauteur crée une zone de basse pression localisée qui peut accentuer la convection thermique vers le haut.
- La distribution de la pression est influencée par la forme de la coupole, qui peut favoriser l'aspiration naturelle de l'air chaud, contribuant à améliorer la ventilation.

➤ **Vitesse :**

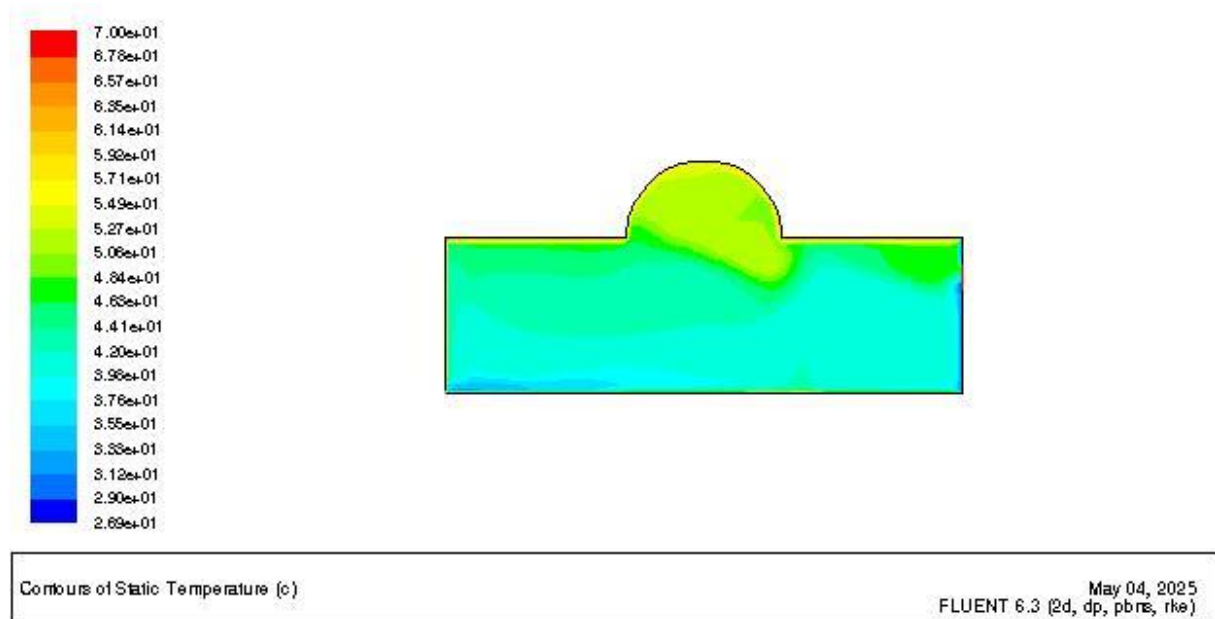


L'air s'engouffre par l'ouverture gauche et se dirige vers la fenêtre droite, avec une accélération au niveau de la coupole si la convection thermique est importante.

- Interprétation :
- La vitesse est maximale au niveau des ouvertures, notamment à l'entrée.
- La coupole agit comme un accélérateur local de la vitesse si une convection naturelle ascendante s'y établit.

- Dans l'espace intérieur, la vitesse diminue progressivement, mais des mouvements verticaux apparaissent sous la coupole, favorisant un brassage de l'air chaud en hauteur.
- Le flux d'air est plus fluide qu'en l'absence de sortie, ce qui réduit les zones stagnantes.

➤ **Température :**



La présence d'une coupole permet une meilleure régulation thermique, en favorisant la stratification naturelle et l'évacuation de l'air chaud.

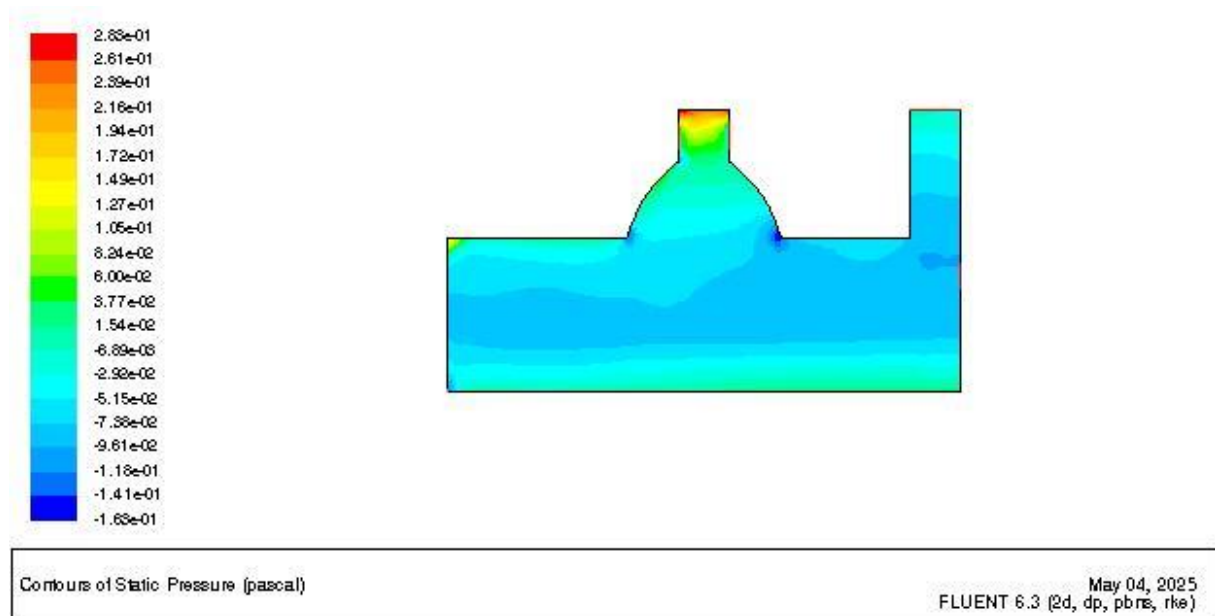
- **Interprétation :**

- L'air frais entrant abaisse localement la température à l'entrée, tandis que l'air chaud est aspiré vers le haut.

- Une stratification thermique s'établit, avec un air plus chaud concentré dans la coupole.
- La circulation permet une évacuation partielle de la chaleur, limitant la surchauffe.
- La température est plus homogène que dans le cas sans sortie, mais reste plus élevée en partie haute.

Cas 8 : Coupole avec ouverture supérieure + cheminée + fenêtre latérale (droite)

➤ Pression :



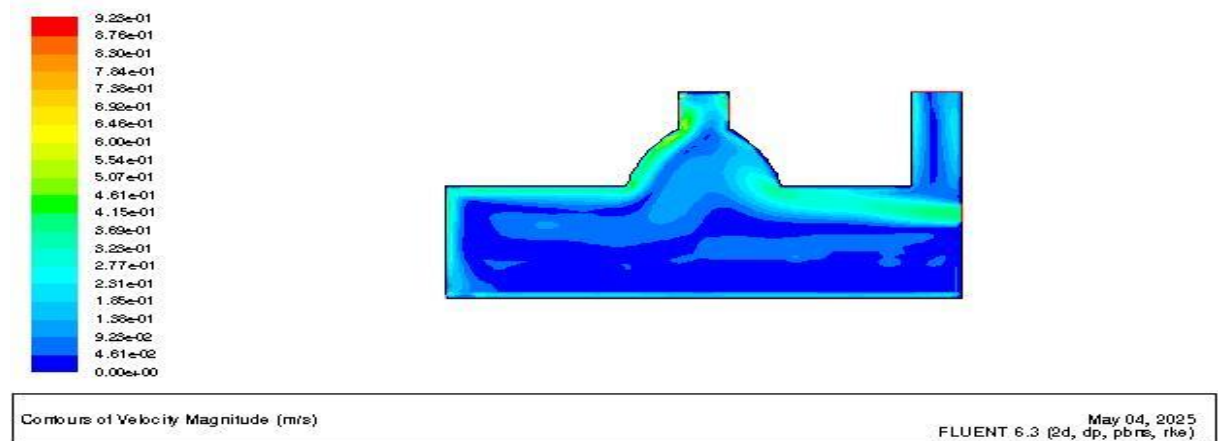
La présence de deux ouvertures hautes supplémentaires sur la coupole modifie significativement les gradients de pression, favorisant une ventilation verticale renforcée.

- Interprétation :

- La pression est plus basse dans la zone haute grâce aux deux sorties.
- Le gradient de pression vertical est encore renforcé par rapport au cas 8, maximisant le potentiel de tirage thermique.
- Une dépression se forme dans la coupole, ce qui stimule la montée naturelle de l'air chaud.

➤ **Vitesse**

:

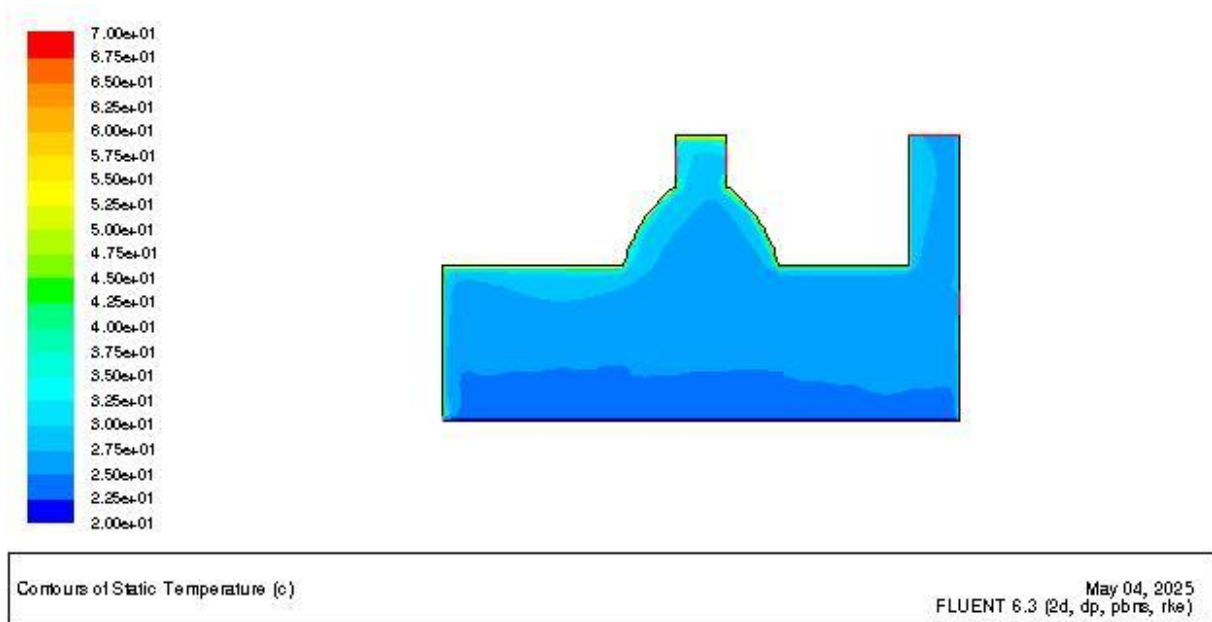


La combinaison cheminée + sorties hautes augmente la complexité et l'efficacité du flux d'air.

• **Interprétation :**

- La vitesse est élevée au niveau des trois sorties (cheminée et les deux ouvertures supérieures).
- L'air chaud est extrait rapidement, entraînant un flux d'air constant et soutenu depuis l'entrée.
- Le volume d'air renouvelé est plus important, ce qui réduit les zones stagnantes et améliore la qualité de l'air.
- Des mouvements ascendants plus marqués apparaissent au centre et sous la coupole.

➤ **Température :**

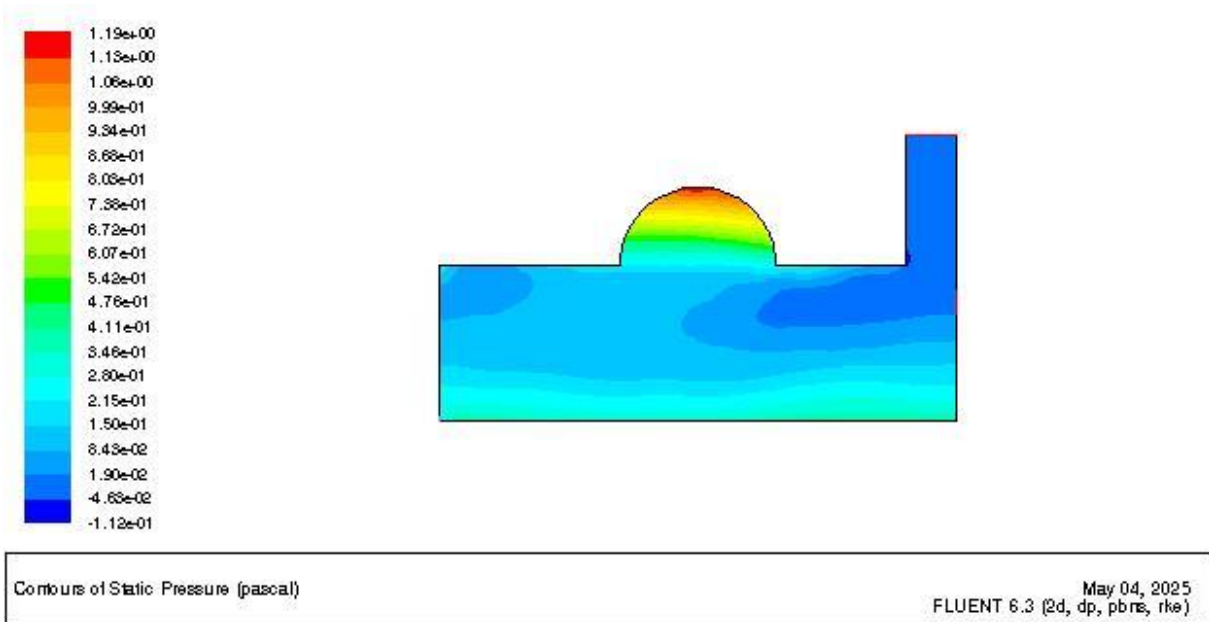


La température intérieure devient plus homogène grâce à une ventilation ascendante multiple et efficace.

- Interprétation :
- L'évacuation rapide de l'air chaud limite la stratification excessive.
- Le rafraîchissement par renouvellement d'air est plus efficace, même en cas de fort ensoleillement.
- Le système évite la surchauffe dans la coupole, contrairement aux cas précédents.
- Le confort thermique est nettement amélioré dans toute la maison.

Cas 9 : Coupole fermée (sans ouverture en haut) + cheminée + fenêtre droite

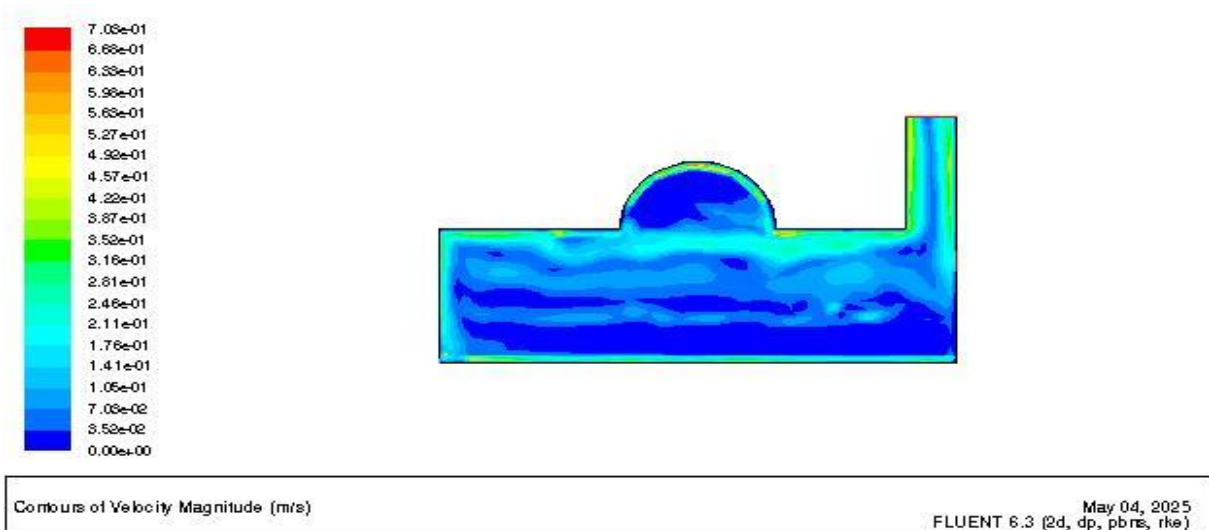
➤ Pression :



L'ajout d'une cheminée crée un nouveau chemin d'évacuation de l'air chaud, influençant directement la répartition de la pression.

- Interprétation :
- La pression est élevée à l'entrée d'air (gauche) et plus faible au niveau de la cheminée.
- Cette configuration amplifie le gradient de pression vertical, ce qui favorise la convection naturelle ascendante.
- La cheminée agit comme un puits de dépression en hauteur, ce qui améliore l'efficacité de l'évacuation thermique.

➤ **Vitesse :**



La vitesse augmente sensiblement dans la cheminée, surtout si l'air intérieur est chauffé, créant un effet de tirage thermique.

- Interprétation :

- La vitesse est élevée à l'entrée et au niveau de la cheminée.

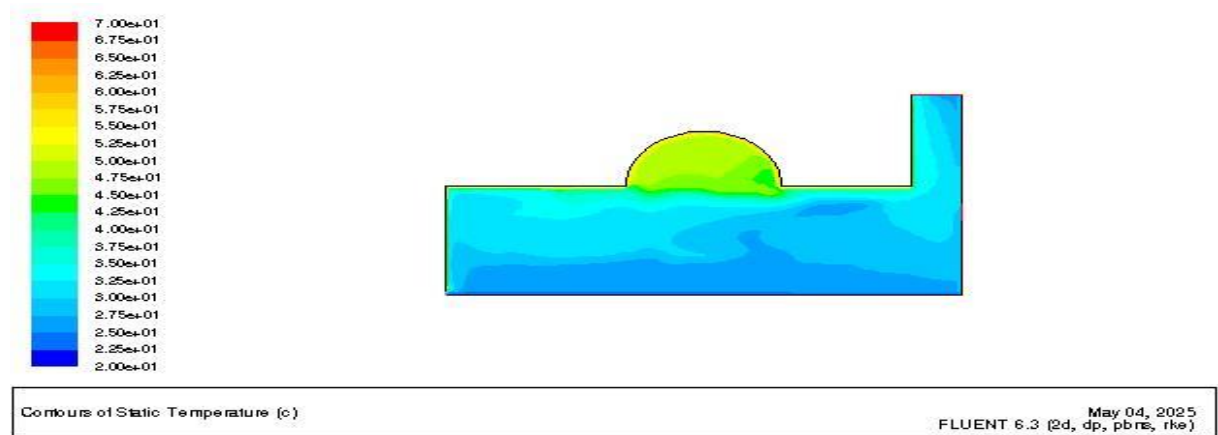
- L'air suit un trajet horizontal d'entrée-sortie via la fenêtre droite, mais une partie s'échappe verticalement par la cheminée.

- Des courants d'air ascendants peuvent se développer au centre de la pièce, renforçant le brassage.

- L'ajout de la cheminée diminue les zones mortes et améliore la distribution de la vitesse.

➤ **Température**

:



L'extraction par cheminée améliore le confort thermique, surtout en cas d'accumulation de chaleur en hauteur.

- Interprétation :

- L'air chaud s'élève naturellement vers la cheminée où il est évacué efficacement.

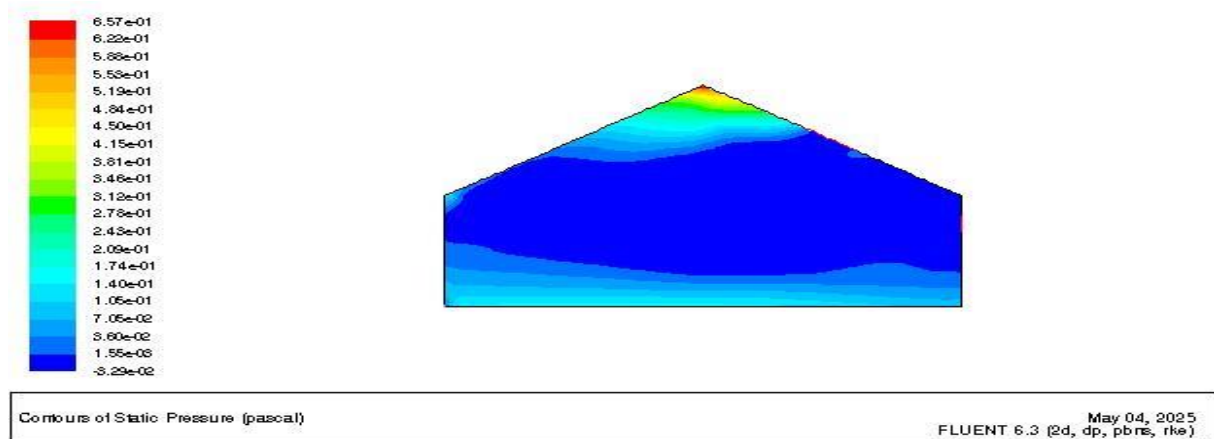
- Cela réduit la température dans la coupole et stabilise le profil thermique global.

- Une meilleure homogénéité thermique est obtenue par la ventilation verticale combinée à la ventilation traversante.

- L'effet cheminée optimise l'évacuation de la chaleur excédentaire.

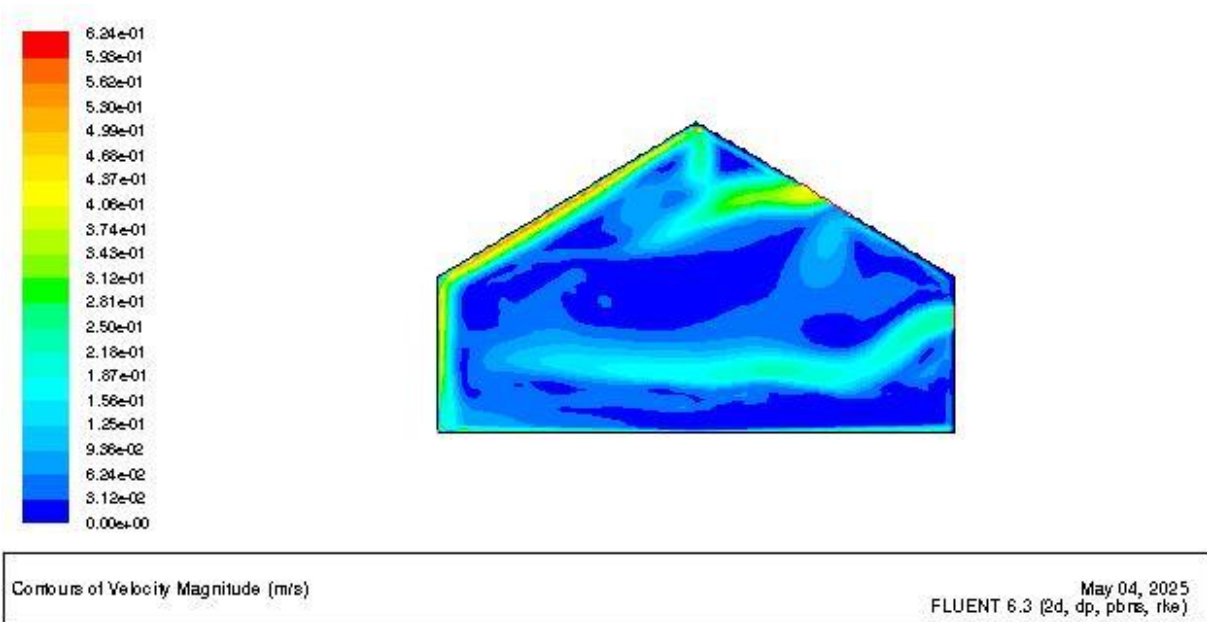
Cas 10 : Toit à pignon

➤ Pression :



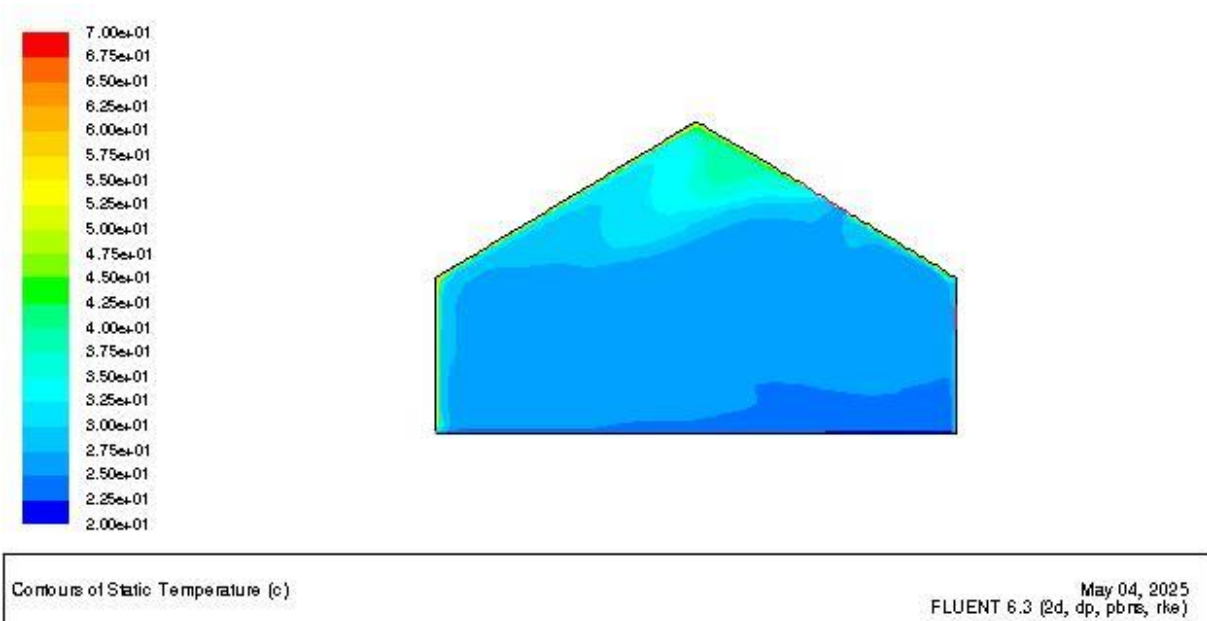
La configuration avec un toit à pignon modifie légèrement la répartition de la pression par rapport à un toit plat. L'air entre par l'infiltration à gauche et est évacué par la fenêtre à droite. La pression est plus élevée à l'entrée d'air et décroît progressivement vers la sortie. Le toit à pignon permet une légère remontée de l'air chaud, influençant localement les gradients de pression. Cette forme architecturale aide à diriger le flux d'air vers la sortie.

➤ Vitesse :



L'air s'écoule de manière plus guidée que dans une maison à toit plat. La pente du toit favorise une accélération naturelle de l'air vers la sortie droite. La vitesse est maximale à l'entrée et à la sortie, avec des mouvements d'air plus orientés. La toiture à pignon contribue à canaliser l'air chaud ascendant, réduisant les zones stagnantes.

➤ Température :



Le toit à pignon aide à diriger l'air chaud vers le sommet central, favorisant une évacuation plus efficace par la fenêtre droite. La température reste plus stable, avec une meilleure

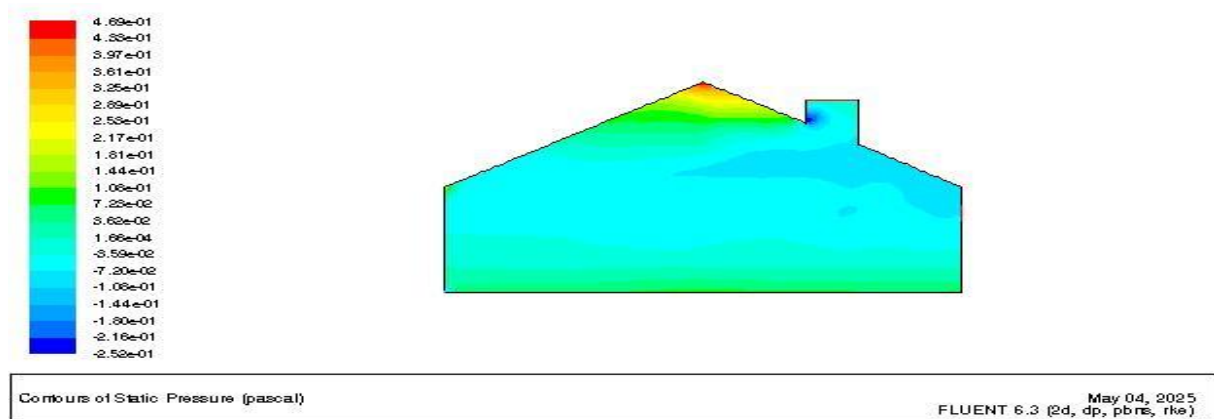
répartition verticale. Une stratification thermique légère peut persister, mais le flux d'air permet un rafraîchissement satisfaisant.

- **Conclusion :**

La présence d'un toit à pignon améliore la circulation naturelle et la régulation thermique, comparée à un toit plat. L'air circule mieux, la chaleur est évacuée plus efficacement et la pression est mieux équilibrée dans l'ensemble du volume. Ce type de toiture optimise la ventilation naturelle.

Cas 11 : Toit à pignon + cheminée

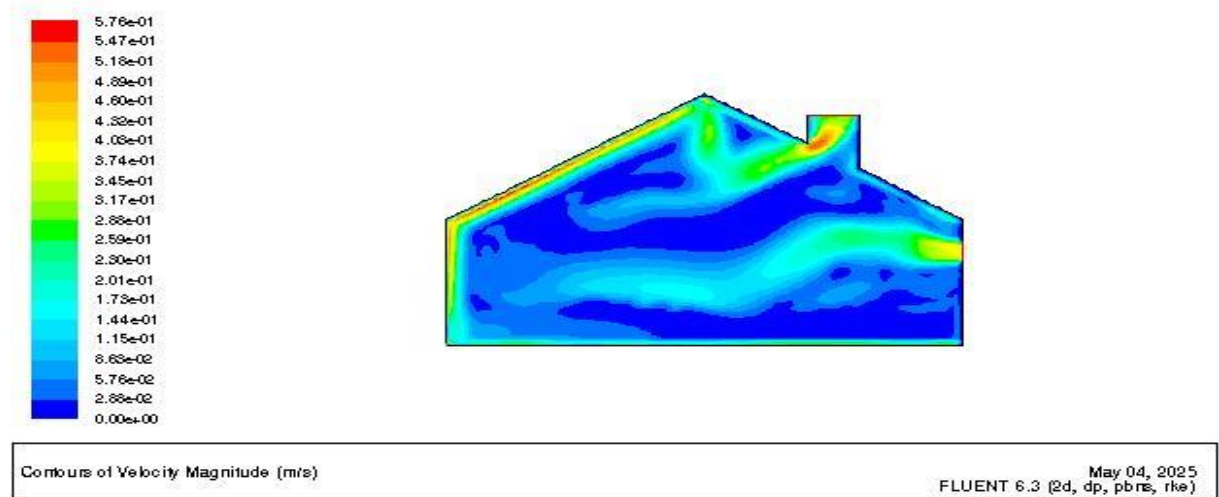
➤ **Pression :**



L'ajout d'une cheminée accentue le gradient de pression entre l'entrée à gauche et la sortie haute à droite. Cette disposition renforce la convection naturelle. La cheminée agit comme un point de dépression thermique, aspirant l'air chaud qui monte naturellement sous l'effet du chauffage ou du rayonnement solaire.

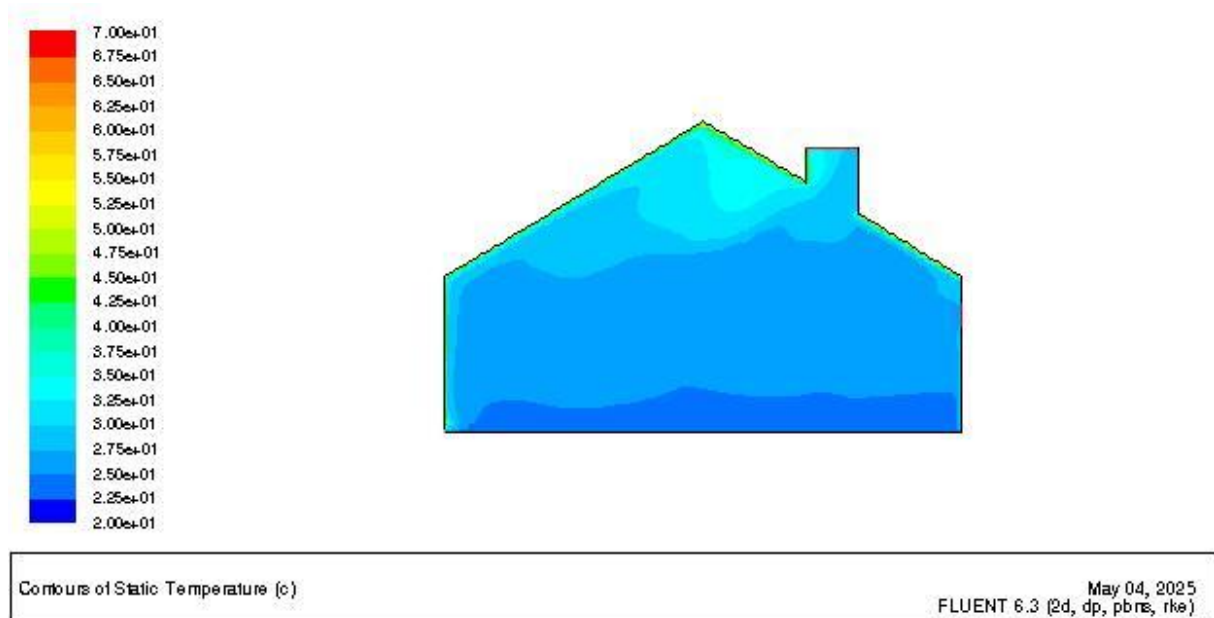
➤ Vitesse

:



La vitesse de l'air augmente sensiblement au niveau de la cheminée. Elle facilite une ventilation verticale efficace. L'air entre par l'infiltration gauche, circule horizontalement, puis s'évacue vers le haut via la cheminée. Le toit à pignon canalise toujours l'air ascendant, mais la cheminée renforce la dynamique verticale.

➤ Température :



L'air chaud monte et s'échappe par la cheminée, réduisant l'accumulation thermique dans les parties hautes. Cette configuration permet une meilleure homogénéité thermique, avec une

température plus basse en hauteur. La combinaison toiture à pignon + cheminée optimise la stratification thermique.

- **Conclusion :**

L'ajout de la cheminée améliore considérablement le confort thermique et la qualité de l'air. Elle renforce le tirage naturel et améliore le renouvellement d'air. La combinaison de l'infiltration, de la fenêtre et de la cheminée, appuyée par la forme du toit, offre une configuration très performante en ventilation naturelle.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de ce mémoire, l'étude menée a permis de mettre en évidence l'importance de la ventilation naturelle dans l'amélioration du confort thermique et de la performance énergétique des maisons bioclimatiques. À travers une approche combinée entre revue théorique, analyse climatique locale et modélisation numérique, nous avons pu mieux comprendre les mécanismes physiques qui régissent la circulation de l'air dans l'espace bâti et évaluer l'efficacité des différents dispositifs de ventilation passive.

L'analyse climatique de la région de Tlemcen a révélé des besoins spécifiques en matière de ventilation et de protection solaire, liés à un climat caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers relativement humides. L'étude bioclimatique a permis de formuler des recommandations architecturales adaptées au contexte local, telles que l'orientation des ouvertures, l'usage de matériaux à faible inertie et l'intégration de dispositifs comme les cheminées solaires, les tours à vent ou les coupoles.

Les simulations numériques réalisées sous ANSYS Fluent ont permis de comparer plusieurs configurations de la maison bioclimatique, en mettant en évidence l'impact des ouvertures, des conduits de ventilation et des éléments architecturaux sur la répartition de la pression, la vitesse de l'air et la température intérieure. Les résultats ont montré que des choix judicieux de conception peuvent considérablement améliorer la qualité de l'air intérieur et réduire la dépendance aux systèmes mécaniques.

En conclusion, ce travail confirme que la ventilation naturelle, lorsqu'elle est bien conçue et adaptée au climat local, constitue une solution durable, efficace et écologique pour le confort des occupants et la maîtrise des consommations énergétiques dans le bâtiment. Il ouvre également la voie à des recherches futures sur l'optimisation des systèmes hybrides de ventilation et l'intégration de l'énergie renouvelable dans l'habitat bioclimatique.

Bibliographie & webographie

Références et bibliographie

CHAPITRE 1

- [1] : Prime éco énergie Auchan, organisation de rénovation énergétique de domotique crée 20 Juin 2018 exerçant en France <https://www.prime-eco-energie.auchan.fr>
- [2] : <https://www.greenkub.fr>
- [3] : <https://www.qualitel.org>
- [4] : Izard. J.L, Guyot. A, Archi Bio, Editions Parenthèses, Paris, 1979, p. 22.
- [5] : Bozonnet Emmanuel, Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments, cas de la rue canyon, thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, France, 2005,
- [6] : De Herde A. et LiébardA, traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, paris, 2005,p63.
- [7] : <https://fr.vecteezy.com>
- [8] : <https://inforef.be>
- [9] : <https://inforef.be>
- [10] : Pierre Lajoie, M.D., FRCPC, Direction Risques biologiques, environnementaux et occupationnels, " La ventilation des bâtiments d'habitation : impacts sur la santé respiratoire des occupants"; Institut national de santé publique du Québec, Février 2006, page III.
- [11] : Flory-Celini, les solutions bioclimatiques, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard,2008.
- [12] : B. Givoni; "l'homme, l'architecture et le climat", Edition Le Moniteur, 1978, page275.
- [13] : L. Nélis,C. Baltus,J.-M. Guillemeau,P. Wagelmans, Guide pratique de la ventilation naturelle des habitations, page 16.
- [14] : Tareb.
- [15] : Tareb.
- [16] : Axley 2001.
- [17] : M. Raoust, J.F Autissier, A. Bornarel, S. Brindel-B, guide bio tech « la ventilation naturelle » France, 2012,page15.
- [18] : <https://www.dh-partner.com>
- [19] : Tareb, 2004.
- [20] : <https://energieplus-lesite.be>
- [21] : Tareb, 2004.
- [22] : Tareb.
- [23] : <https://www.researchgate.net>

- [24] : De Herde A. et Liébard A, traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, paris, 2005, p374.
- [25] : <https://www.researchgate.net>
- [26] : Alain Liébard, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, édition Le Moniteur. (2005).
- [27] : <http://dspace.univ-tiaret.dz>
- [28] : Mlle Khaldi Sabrina, Etude numérique de la ventilation naturelle par la cheminé solaire, Mémoire de magister en mécanique énergétique, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen Faculté de technologie Département de génie mécanique. 2013.
- [29] : Saheb bilal et Larab Nasr eddine 2018 ETUDE SIMILATION DE VENTILATION DUN LOCAL PRJET FIN DETUDE MASTER LMD Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées depaetement de genie mecanique univeriste de Bouira.
- [30] : H. Bencheikh, Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio évaporative dans les climats chauds et arides, Thèse doctorat, Université Mentouri de Constantine, (2007).

CHAPITRE 2

- [31] H. M'Sellem et D. Alkama, Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3, pp. 471 – 488 (2009).
- [32] Alain Liébard, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, édition Le Moniteur. (2005).
- [33] J. Koffi, Analyse Multicritère Des Stratégies De Ventilation En Maisons Individuelles, Thèse De Doctorat, université de la rochelle, France, (2009).
- [34] André De Herde et Alain Liébard, traité architecture et urbanisme bioclimatique, 2005.
- [35] <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tlemcen/tlemcen-990323/>
- [36] André De Herde et Alain Liébard, traité architecture et urbanisme bioclimatique, 2005.
- [37] <https://fr.weatherspark.com/>
- [38] André De Herde et Alain Liébard, traité architecture et urbanisme bioclimatique, 2005.
- [39] <https://www.wofrance.fr/>
- [40] <https://www.researchgate.net/>
- [41] André De Herde et Alain Liébard, traité architecture et urbanisme bioclimatique, 2005.
- [42] <https://www.climatsetvoyages.com/>
- [43] <https://fr.weatherspark.com/>
- [44] <https://fr.climate-data.org/>

[45] <https://fr.climate-data.org/>

CHAPITRE 4

[46] M.Slack. Cyclonic separator. Fluent Europe Ltd. GTC1-CT99-10030.

[47] Saheb bilal et Larab Nasr eddine 2018 ETUDE SIMILATION DE VENTILATION DUN LOCAL PRJET FIN DETUDE MASTER LMD Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées département de génie mécanique université de Bouira.

[48] Versteeg & Malalasekera (2007), Ferziger & Perić (2002) – Définitions fondamentales de la CFD et du maillage.

[49] Versteeg & Malalasekera (2007) – Description du comportement des maillages et des effets numériques

[50] Tu et al. (2018), Ferziger & Perić (2002) – Avantages numériques, rapidité de convergence et précision.

[51] Versteeg & Malalasekera (2007), ANSYS (2023) – Difficultés de génération pour géométries complexes.

[52] Versteeg & Malalasekera (2007), ANSYS (2023) – Critères de qualité : skewness, orthogonalité, aspect ratio.

[53] Saheb bilal et Larab Nasr eddine 2018 ETUDE SIMILATION DE VENTILATION DUN LOCAL PRJET FIN DETUDE MASTER LMD Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées département de génie mécanique université de Bouira.

Annexe

