

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Architecture
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en : Architecture

Option : Ville et Architecture au Sahara

Intitulé

**L'impact de la fenêtre sur le comportement thermique et respiratoire
dans les constructions à forte inertie dans les zones chaudes et arides**

Présenté par :

M^{me} Chakali Meriem

Soutenu publiquement le 30/04/2019

Devant le jury composé de :

Pr. Moummi Abdelhafid

Professeur

Président

Université de Biskra

Dr. Belhadj Belkacem

Maitre de Conférences 'A'

Examineur

Université de Laghouat

Pr. Bencheikh Hamida

Professeur

Rapporteur

Université de Laghouat

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ... ✍️

A mes très chers parents, pour leur : amour et le bonheur qu'ils m'ont toujours porté, sacrifice, patiences, soutien moral et matériel depuis mon enfance jusqu'à ce jour.

A mon mari qui m'a accompagné tout au long de la réalisation de ce travail. Sans ses conseils, sa patience, son amour je n'aurais pas pu aboutir à ce manuscrit.

A mon petit fils Mohammed Anis.

A mes chères sœurs Amina, Halima et Houria.

A ma très aimable petite famille pour leur accompagnement et leur encouragement.

A tous mes enseignants qui m'ont éclairé sur ce chemin du savoir.

Chakali Meriem

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, le courage, la patience et la volonté de mener à bien ce mémoire.

*Toute ma reconnaissance à mon encadreur Pr. **BENCHEIKH HAMIDA** qui a accepté de diriger ce mémoire de Magistère et qui m'a proposé ce sujet riche. Merci monsieur d'avoir encadré ce travail avec beaucoup de compétences, Merci pour votre temps, vos idées, pour votre aide et conseils précieux sans lesquelles le travail n'aurait pu être effectué.*

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury Pour m'avoir fait l'honneur de présider et d'examiner ce travail, et pour avoir accepté d'apporter leurs précieuses remarques et leurs orientations.

*Je tiens aussi à remercier ma chère amie Mme **Dohsi Kfiadidja** pour son aide et son soutien.*

Mes remerciements vont également aussi à tous mes professeurs de post graduation pour leur don pendant l'année théorique.

*Je n'oublie pas mes enseignants de l'université de Laghouat : Mr **Bencheikh Abderrezak**, Mr **Mokkadem Mahmoud**, Mr **Mordjani Hamza**, Mr **Laroui Mohamed**, Mr **Mezaouekh Lakhdar**, pour leur attention, disponibilité, aides et encouragements.*

Je tiens à associer à ces remerciements, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

Enfin, mes remerciements les plus profonds et sincères s'adressent à mon mari et ma famille dont je serai éternellement reconnaissante pour le soutien sans faille, l'amour et le bonheur qu'ils m'ont toujours porté

Résumé

Aujourd'hui, un bon confort thermique d'été et une bonne qualité de l'air intérieur dans nos bâtiments constitue des véritables enjeux pour le bien-être des occupants. L'enveloppe du bâtiment est le premier des éléments sur lequel le concepteur doit intervenir pour créer des conditions de confort satisfaisantes à l'intérieur. De nombreuses recherches ont confirmées que la fenêtre est l'un des éléments de l'enveloppe qui a des effets positifs et significatifs sur le confort thermique et respiratoire des usagers.

La présente recherche s'intéresse à la qualité thermique et respiratoire intérieure dans les constructions à forte inertie. Elle a pour objectif d'évaluer expérimentalement et numériquement l'impact de la fenêtre sur le confort thermique et respiratoire dans des chambres réelles à forte inertie thermique d'un ancien hôtel (Marhaba) situé au cœur de la ville de Laghouat (zone chaude et aride) en période estivale. Ce travail est fondé sur deux parties majeures. Une recherche théorique et une autre pratique. La première partie (théorique) est basée sur une recherche bibliographique qui permet une meilleure compréhension des connaissances ayant une relation avec la recherche. La partie pratique est basée sur une campagne de mesure menée sur deux chambre en période estivale à l'aide d'instrumentation technique, ainsi qu'une évaluation numérique s'appuie sur une simulation numérique via le logiciel EnergyPlus (version 8.4.0) effectuée pour valider les résultats de l'investigation, et permet de tester divers paramètres qui peuvent aboutir à des meilleures conditions.

Les résultats de ces évaluations (in-situ et numérique) nous ont permis de constater que la dimension et l'orientation de la fenêtre sont les deux paramètres les plus significatifs pour atteindre les conditions de confort requises dans l'espace en été en climat chaud et aride.

Nous avons relevé aussi d'une part qu'une chambre a forte inertie, associé à une gestion de ventilation naturelle nocturne possède un confort d'été meilleure qu'une chambre a forte inertie non ventilé. Et d'autre part que l'effet de la ventilation naturelle nocturne sur la température de l'air intérieure diurne dépend directement de la vitesse du vent.

Mots clés :

Le confort thermique, La qualité de l'air, L'inertie thermique, Climat chaud et aride, La fenêtre, La ventilation nocturne.

Abstract

Nowadays, the need of high thermal comfort and better inside air quality in our buildings constitute real stakes for the well-being of the occupants. The building envelope is the first elements on which the designer must take into account to create the inside comfort satisfactions. Many studies have confirmed that the window is one of the elements of the envelope that has positive and significant effects on the thermal comfort and air flow rate needs for the users.

This research focuses on the indoor thermal comfort and air quality in high-inertia buildings. Its objective is to evaluate experimentally and numerically the impact of the window on the thermal comfort and air flow rate in real high thermal inertia rooms in old hotel called Marhaba located in the heart of Laghouat hot Dry zone during summer period. This work is based on two major parts, theoretical and practical. The theoretical part is based on a bibliographic research that allows a better understanding of knowledge related to the topic. The practical part is based on a field measurements campaign conducted inside two rooms during summer period by using technical instrumentation, as well as a numerical evaluation based on a numerical simulation by using Energy Plus software (version 8.4.0) carried out to validate the results of the investigation, and makes it possible to test various parameters which can lead to better conditions.

The results of these evaluations (in-situ and numerical) have found that the size and the orientation of the window are the two most significant parameters to reach the required comfort conditions in the summer space in dry and warm climate

We also noted that a room with high inertia, associated with a night natural ventilation has better summer comfort than a room with high inertia unventilated. On the other hand, the effect of natural night ventilation on daytime indoor air temperature depends directly on the wind speed

Keywords:

Thermal comfort, Air quality, Thermal inertia, Dry and warm climate, Window, Night ventilation.

ملخص

تشكل الراحة الحرارية الجيدة في فصل الصيف ونوعية الهواء الداخلي الجيد في البنايات رهانا حقيقيا لرفاهية المستخدمين. الغلاف هو أول عنصر يجب على المصمم أن يتدخل فيه لخلق ظروف مريحة للراحة في الداخل. وقد أكدت العديد من الدراسات أن النافذة هي واحدة من عناصر الغلاف التي لها تأثيرات إيجابية وكبيرة على الراحة الحرارية والتنفسية للمستخدمين.

هذه الدراسة تتمحور حول الجودة الحرارية والتنفسية الداخلية في البنايات ذات السكون الحراري العالي. حيث تهدف إلى إجراء تقييم تجريبي وعددي لتأثير النافذة على الراحة الحرارية والتنفسية في فصل الصيف وذلك في غرف حقيقية ذات سكون حراري عالي في فندق قديم "مرحبا" الذي يقع في قلب مدينة الأغواط (منطقة جافة وحارة). ينقسم هذا العمل إلى قسمين رئيسيين هما: دراسة نظرية ودراسة تطبيقية. يعتمد الجزء الأول (النظري) على بحث شامل يجمع البيانات يسمح بفهم معمق لموضوع البحث. أما الجزء العملي فيعتمد على استقصاء ميداني باستخدام أجهزة تقنية مطبق على غرفتين في فندق "مرحبا" في فصل الصيف. بالإضافة إلى تقييم عددي يستند على محاكاة رقمية من خلال برنامج energyplus (الإصدار 8.4.0)، تم إجراؤه للتحقق من صحة النتائج المتوصل إليها ميدانيا و إختبار عدة عناصر التي تسمح للوصول إلى أحسن الشروط.

سمحت لنا نتائج هذه التقييمات (الميدانية والرقمية) بملاحظة أن أبعاد واتجاه النافذة هما أهم عاملين لتحقيق ظروف الراحة المطلوبة في فصل الصيف في المناخ الحار والجاف.

لاحظنا أيضا أن الغرفة ذات السكون الحراري العالي المرتبطة بالتهوية الليلية الطبيعية توفر راحة أفضل في فصل الصيف من الغرفة ذات السكون الحراري العالي بدون تهوية. وكذلك تأثير التهوية الليلية الطبيعية على درجة حرارة الهواء الداخلي خلال النهار يعتمد بشكل مباشر على سرعة الرياح.

الكلمات المفتاحية:

الراحة الحرارية، نوعية الهواء، السكون الحراري، المناخ الجاف و الحار، النافذة، التهوية الليلية.

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	X
Nomenclature.....	XI
Introduction générale.....	01
1-Problématique.....	03
2-Hypothèses.....	04
3-Objectifs.....	05
4- Méthodologie et structure de la recherche.....	05
PARTIE THEORIQUE	
Chapitre I : Généralités sur l'inertie thermique des constructions	
Introduction.....	07
I.1- Exemples d'application de l'inertie thermique dans l'architecture vernaculaire....	07
I.1.1- L'architecture troglodytique.....	08
I.1.2- L'architecture massive.....	10
I.1.3- L'architecture des igloos.....	11
I.2- Caractérisation de l'inertie (Quelques rappels théoriques).....	13
I.2.1- Concepts et définitions.....	13
I.2.2- Principes de l' inertie thermique.....	16
I.2.2.1- Transfert de chaleur.....	17
I.2.2.2- Stockage de chaleur.....	18
I.2.2.3- Distribution de la chaleur.....	19
I.2.3- L'inertie thermique et les matériaux.....	20
I.2.4- Les paramètres de l'inertie.....	21
I.2.4.1- Diffusivité thermique « a ».....	21
I.2.4.2- Effusivité thermique « b ».....	23
I.2.5- Les méthodes à quantifier la capacité du stockage thermique.....	25
I.2.5.1-La méthode de l'admittance.....	25
I.2.5.2- La méthode de la capacité de la chaleur diurne.....	26
I.2.6- Type d'inertie thermique.....	29
I.2.6.1- Inertie de transmission.....	29
I.2.6.2- Inertie par absorption.....	30
I.2.7- Détermination de la classe d'inertie.....	31
I.3- Les Paramètres influençant la performance de l'inertie thermique.....	31
I.3.1- Conditions du climat.....	31
I.3.2- Propriétés thermiques des matériaux de construction.....	33
I.3.3- Ventilation.....	34
I.3.4- L'inertie thermique et l'isolation.....	37
I.3.5- Occupation et gains de chaleur internes.....	38
I.3.6- Les fenêtres.....	39
I.3.7- Emplacement et distribution de l'inertie thermique.....	40
I.4- Le rôle de l'inertie sur le confort thermique.....	42
I.4.1- L'efficacité de l'inertie thermique en été.....	42
I.4.2- L'inertie thermique et l'effet de la ventilation naturelle.....	47
Conclusion.....	51

Chapitre II : Impact de la fenêtre sur le confort thermique et respiratoire

Introduction	52
II.1- Définition de la fenêtre	53
II.2- Evolution historique de la fenêtre	53
II.2.1-Moyen Age.....	54
II.2.2-XVe et XVIe siècles.....	54
II.2.3-XVIIe siècle.....	54
II.2.4-XVIIIe siècle.....	55
II.2.5-Du milieu du XIXe siècle.....	55
II.2.6-XXe siècle.....	55
II.3- Structure et composition d'une fenêtre	56
II.4- Les différents types de fenêtres	57
II.4.1- Selon la forme.....	57
II.4.2- Selon la taille.....	58
II.4.3- Selon le système d'ouverture.....	58
II.5- Fenêtres entre rôle et exigences	59
II.6- Les modes de transfert thermique dans une fenêtre	60
II.7- Critères de performance de l'ensemble de la fenêtre	61
II.7.1- Le coefficient de transmission thermique U_w	61
II.7.2- Le facteur solaire S_w	62
II.7.3- Le facteur de transmission lumineuse TL_w	63
II.8-Propriétés optiques du vitrage	63
II.8.1- L'absorptivité (α).....	64
II.8.2- La réflectivité (ρ).....	65
II.8.3- La transmissivité (τ).....	65
II.9- Le contrôle des apports solaires	67
II.9.1- Fonctions principales des dispositifs de protection solaire.....	67
II.9.2- Choix du type de la protection solaire.....	68
II.9.2.1- Les dispositifs de protections solaires intérieures.....	68
II.9.2.2- Les dispositifs de protection solaire fondés sur les propriétés de transmission du vitrage.....	70
II.9.2.3- Les dispositifs de protection solaire extérieurs.....	71
a. Les dispositifs de protection solaire fixes.....	72
b. Les dispositifs de protection solaire mobiles.....	73
II.10- Impact de la fenêtre sur l'environnement intérieur	74
II.10.1- La fenêtre et le confort thermique.....	74
II.10.1.1-Les paramètres de la fenêtre affectant la performance thermique.....	74
a. Effet de l'orientation des fenêtres.....	75
b. Effet de la forme des fenêtres.....	79
c. Effet de la position des fenêtres.....	80
d. Effet du type et des caractéristiques thermiques du vitrage.....	80
e. Influence de la dimension de la fenêtre.....	81
f. Influence du dispositif d'occultation.....	84
II.10.2-La fenêtre et le confort respiratoire.....	85
II.10.2.1-Définition de la notion de confort respiratoire.....	85
II.10.2.2-Qualité de l'air intérieur.....	86
II.10.2.3- Le renouvellement d'air.....	87
II.10.2.4-La ventilation hygiénique.....	88
a. La ventilation naturelle.....	89
-L'effet du vent.....	89
-Le tirage thermique.....	90

- Couplage des deux forces motrices.....	90
- Ventilation naturelle « mono-façade».....	91
- Ventilation naturelle « traversante ».....	92
b. Débit de ventilation.....	95
II.10.2.5-Effet de la conception des fenêtres sur la ventilation naturelle.....	96
a. Influence de l'orientation des fenêtres par rapport au vent sur ventilation.....	97
b. Influence de l'emplacement des fenêtres.....	98
c. Influence de la position verticale de fenêtres.....	100
d. Influence des dimensions de la fenêtre.....	101
e. Influence de type des fenêtres.....	102
f. Influence de dispositifs architecturaux lié ou détaché de la façade.....	103
Conclusion.....	105
PARTIE PRATIQUE	
Chapitre III : Etude expérimentale	
Introduction.....	106
III.1-Les Données climatiques de la zone d'étude.....	106
III.1.1-situation de la ville de Laghouat.....	106
III.1.2-Les conditions climatiques.....	107
III.1.2.1-La température de l'air.....	108
III.1.2.2-Ensoleillement.....	108
III.1.2.3-Le vent.....	109
III.1.2.4-Les précipitations.....	110
III.1.2.5-L'humidité relative.....	110
III.2-Le diagramme bioclimatique de Givoni.....	111
III.3-Présentation du cas d'étude.....	113
III.3.1-Le cas d'étude « hôtel Marhaba ».....	113
III.3.2-Les pièces instrumentées (chambres).....	115
III.3.2.1- Choix des pièces instrumentées.....	115
III.3.2.2- Description des pièces instrumentées.....	116
III.4-Les instruments de mesure utilisés.....	120
III.4.1- Station météorologique.....	121
III.4.2-L'hygro-thermographe « 1.0660 ».....	122
III.4.3- le thermomètre digital a sonde intégrée « Testo 415 ».....	123
III.5- Le déroulement de l'étude expérimentale.....	124
III.5.1- Description de l'expérimentation.....	124
III.5.2-Conditions de déroulement des mesures.....	124
III.5.2.1-Pour la chambre (A).....	124
III.5.2.2-Pour la chambre (B).....	124
III.6- Analyse et interprétation des résultats expérimentaux (Période estivale).....	125
III.6.1-Les résultats de mesures de la température de l'air intérieure et extérieure.....	125
III.6.1.1-Le premier jour de prise de mesures de température de l'air : 14 Juillet 2016.....	125
III.6.1.2- Le deuxième jour de prise de mesures de température de l'air : 15 Juillet 2016.....	127
III.6.1.3- Le troisième jour de prise de mesures de température de l'air : 16 Juillet 2016.....	128
III.6.1.4- Synthèse.....	130

Conclusion	132
Chapitre IV : simulation numérique	
Introduction	133
IV.1- Choix d’outil de simulation	133
IV.2- Présentation de l’outil « Energyplus »	134
IV.2.1- Description de l’outil « Energyplus ».....	134
IV.2.2- Structure de l’outil « Energyplus ».....	135
IV.2.3-Avantages de l’outil « Energyplus ».....	135
IV.3-Présentation de l’interface	136
IV.3.1- Description.....	136
IV.3.2- Données introduites.....	137
IV.4- Objectifs de la simulation	138
IV.5- Déroulement de la simulation	139
IV.6- L’évaluation numérique	140
IV.6.1- Analyse du modèle de référence.....	140
IV.6.2- Analyse des stratégies d’ amélioration.....	144
IV.6.2-1-Le 1 ^{er} scénario : Les différents rapports WWR (10%,25%,50% et 75%)	144
IV.6.2-2-Le 2 ^{eme} scénario : Orientation de la fenêtre.....	146
IV.6.2-3-Le 3 ^{eme} scénario : Hauteur sous plafond.....	149
IV.6.2-4-Le 4 ^{eme} scénario Le type du vitrage.....	150
IV.6.2-5-Le 5 ^{eme} scénario : Type de ventilation (traversante).....	155
IV.6.2-6-Le 6 ^{eme} scénario : La vitesse du vent.....	160
IV.6.2-7- Calcule du volume d’air échangé par ventilation à travers la fenêtre...	163
Conclusion	164
Conclusions générale	165
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'inertie thermique des constructions

Figure I.1 :	Habitations troglodytes de la Cappadoce en turquie.....	09
Figure I.2 :	Maison troglodyte de kandovan, en Iran.....	09
Figure I.3 :	L'architecture troglodytique « Matmata» en Tunisie.....	09
Figure I.4 :	Vue intérieur d' un espace troglodytique à Matmata.....	09
Figure I.5 :	Habitat à cour avec l'iwan à Gaza.....	11
Figure I.6 :	Plan d'une habitation traditionnelle iranienne.....	11
Figure I.7 :	A- Plan d'une habitation traditionnelle mozabite. B- Vue Axonométrique.....	11
Figure I.8 :	Conception intérieure de l'igloo.....	12
Figure I.9 :	Architecture de l'igloo.....	12
Figure I.10 :	Le déphasage thermique.....	14
Figure I.11 :	L' amortissement.....	15
Figure I.12 :	Le déphasage et l' amortissement dans un bâtiment à forte inertie et dans un bâtiment à faible inertie.....	16
Figure I.13 :	Effet de la forte inertie.....	16
Figure I.14 :	Mécanismes de transfert de chaleur à travers et entre les éléments de construction.....	17
Figure I.15 :	Le processus de stockage et de dissipation de la chaleur dans un cycle diurne....	18
Figure I.16 :	Effet de l'exposition solaire sur la température des surfaces externes.....	19
Figure I.17 :	Différentes configurations spatiales résultant de diverses formes de distribution de masse à l'intérieur de bâtiments de volume de masse similaire.....	20
Figure I.18 :	Effusivité thermique des divers matériaux en fonction de leur masse volumique.....	24
Figure I.19 :	Effet de l'épaisseur sur la capacité calorifique diurne de divers matériaux.....	28
Figure I.20 :	Capacité totale de chaleur diurne de la pièce en fonction de la superficie des surfaces internes.....	28
Figure I.21 :	La réduction de la surface du mur par augmentation de la taille de la fenêtre.....	28
Figure I.22 :	Les deux types d'inertie.....	29
Figure I.23 :	Gains de chaleur internes.....	39
Figure I.24 :	La forte inertie du toit permet un déphasage et un amortissement important.....	42

Chapitre II : Impact de la fenêtre sur le confort thermique et respiratoire

Figure II.1 :	L'histoire de la fenêtre.....	54
Figure II.2 :	Evolution de la morphologie de la fenêtre du XVIème siècle à nos jours.....	56
Figure II.3 :	Les différents composants de la fenêtre.....	56
Figure II.4 :	Présentation schématique d'un fenêtre.....	57
Figure II.5 :	Les différentes formes de fenêtres.....	58
Figure II.6 :	typologie des fenêtres selon le système d'ouverture.....	58
Figure II.7 :	Les exigences de la fenêtre.....	59
Figure II.8 :	Schéma des différents types de transfert thermique au sein d'une fenêtre à double vitrage pendant la saison de chauffe (Text < Tint)	61
Figure II.9 :	Illustration du coefficient de transmission thermique.....	62
Figure II.10 :	Illustration du facteur solaire Sw.....	63
Figure II.11 :	Illustration du facteur de transmission lumineuse TLw.....	63

Figure II.12 :	Illustration du comportement du rayonnement solaire au contact d'une fenêtre...	64
Figure II.13 :	Illustrations du coefficient d'absorption(α)	64
Figure II.14 :	Illustrations du coefficient de réflexion(ρ)	65
Figure II.15 :	Illustrations du coefficient de transmission (τ ,)	66
Figure II.16 :	Absorption, réflexion et transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire.....	66
Figure II.17 :	Transmission de l'énergie solaire à travers une baie vitrée munie d'une protection solaire	67
Figure II.18 :	Fonctions des protections solaires.....	68
Figure II.19 :	Représentation schématique d'une baie vitrée avec protection solaire intérieure..	69
Figure II.20 :	Stores vénitiens.....	69
Figure II.21 :	Stores à enrouleurs	69
Figure II.22 :	Régimes de températures intérieures pour différents systèmes d'occultation	70
Figure II.23:	Verre absorbant.....	71
Figure II.24 :	Verre réfléchissant.....	71
Figure II.25 :	Représentation schématique d'une baie vitrée avec protection solaire extérieure.	72
Figure II.26 :	Protections solaires fixes.....	73
Figure II.27 :	Représentation schématique de différents systèmes de protections solaires extérieures mobiles.....	73
Figure II.28 :	Ouvertures et leurs orientations.....	75
Figure II.29 :	Différentes orientations des fenêtres.....	75
Figure II.30 :	Exposition optimale pour le captage de soleil.....	76
Figure II.31 :	Influence de l'orientation des ouvertures sur les températures intérieures selon différents cas de disponibilité d'occultation et ventilation.....	77
Figure II.32 :	Le gain thermique à travers des fenêtres sans protection solaire à différentes orientations pendant l'été.....	78
Figure II.33 :	Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le sud-est (21 juin)	79
Figure II.34 :	Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le sud-est (21 déc)	79
Figure II.35 :	Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le l'est (21 déc)	79
Figure II.36 :	Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le l'est (21 juin).	79
Figure II.37 :	Performance thermique et type de vitrage.....	81
Figure II.38 :	Effet de la dimension du vitrage sur les températures interne.	82
Figure II.39 :	Effet de surface de fenêtre sur la température intérieure du local.	83
Figure II.40 :	Les polluants extérieurs et intérieurs.....	87

Figure II.41 :	Impacts sanitaires de la pollution de l'air.....	87
Figure II.42 :	L'effet du vent sur le bâtiment.....	89
Figure II.43 :	Effet du tirage thermique.....	90
Figure II.44 :	Effets combinés du vent et du tirage thermique.....	91
Figure II.45 :	Schématisation de la ventilation (a) mono-façade et (b) traversante.....	91
Figure II.46 :	Principe de la ventilation mono-façade ($W_{max} \sim 2.5H$ pour être efficace).	92
Figure II.47 :	Principe de la ventilation traversante ($W_{max} \sim 5H$ pour être efficace).	92
Figure II.48 :	Exemple de solutions architecturales favorisant la ventilation traversante (a) cheminée, (b) atrium, (c) double peau.....	93
Figure II.49 :	Effet du vent perpendiculaire et oblique (environ 45°) a l'ouverture sur la ventilation intérieure.....	98
Figure II.50 :	Ventilation transversale par deux fenêtres dans des murs opposés.....	99
Figure II.51 :	Influence des fenêtres sur des murs adjacents sur la Ventilation	99
Figure II.52 :	Influence des fenêtres sur un côté des murs sur la Ventilation.....	100
Figure II.53 :	Effet de l'emplacement des fenêtres sur la ventilation.....	101
Figure II.54 :	Effet de la taille de l'entrée et de la sortie sur la vitesse de l'air intérieur.....	101
Figure II.55 :	Effet des différents types de fenêtre sur la direction de flux d'air.....	102
Figure II.56 :	Influence des fenêtres pivotantes et à lames sur la ventilation.....	102
Figure II.57 :	Effet des lamelles orientables sur la quantité et la direction du flux d'air.....	103
Figure II.58 :	Effet de l'auvent horizontal sur l'orientation du courant d'air vers le haut.....	104
Figure II.59 :	Influence des fentes au niveau de l'auvent sur la ventilation.....	104
Figure II.60 :	Influence de l'avancée de toiture sur la ventilation.....	104
Chapitre II : Etude expérimentale		
Figure III. 1 :	Situation géographique de la ville de Laghouat.....	106
Figure III. 2 :	Carte de découpage des zones climatiques en Algérie.....	107
Figure III. 3 :	Situation de Laghouat dans la carte des zones climatiques.....	107
Figure III. 4 :	a) Les zones climatiques d'été. b) Les zones climatiques d'hiver.....	108
Figure III. 5 :	Variation des Températures de l'air extérieur (2016)	108
Figure III. 6 :	Diagramme solaire indiquant la trajectoire solaire pour la ville de Laghouat – latitude $33^\circ 46'$	109
Figure III. 7 :	Position du soleil (de bas en haut) au solstice d'hiver, aux équinoxes et au solstice d'été dans la ville de Laghouat.....	109
Figure III. 8 :	Rose des vents de la ville de Laghouat.....	110
Figure III. 9:	Les précipitations moyennes mensuelles de la ville de Laghouat (2016).....	110
Figure III. 10:	Les variations mensuelles de l'humidité relative de la ville de Laghouat (2016)	111
Figure III. 11:	diagramme psychrométrique de Givoni.....	112
Figure III. 12:	Situation de l'hôtel par rapport à la ville.....	113
Figure III. 13:	Plan de masse de l'hôtel.....	113
Figure III. 14:	Façade de l'hôtel sur la rue.....	114
Figure III. 15:	La coursive.....	114

Figure III. 16:	Les loggias des chambres.....	114
Figure III. 17:	Les chambres instrumentées.....	115
Figure III. 18:	Plan générale de l'hôtel (2ème étage).....	115
Figure III. 19:	Plan du 2 ^{ème} étage (Chambre N°42 et N°43 : pièces d'investigation).....	115
Figure III. 20:	La chambre n° 42.....	116
Figure III. 21:	La chambre n° 43.....	116
Figure III. 22:	Détail d'une chambre.....	117
Figure III. 23:	La station base à écran tactile.....	121
Figure III. 24:	Les capteurs externes.....	121
Figure III. 25:	Emetteur solaire tactile.....	121
Figure III. 26:	Capteur de rechange de vitesse pour le vent.....	121
Figure III. 27:	Capteur de rechange de la direction du vent.....	122
Figure III. 28:	Capteur de rechange de pluviométrie.....	122
Figure III. 29:	L'hygro-thermographe pose à l'intérieur de la chambre.....	122
Figure III. 30:	L'hygro-thermographe.....	122
Figure III. 31:	Les deux aiguilles qui inscrivent les températures et les humidités relatives.....	123
Figure III. 32:	Le thermomètre digital a sonde intégrée.....	123
Figure III. 33:	Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentale, avec et sans ventilation naturelle nocturne (1 ^{er} essai : 14/07/2016).....	125
Figure III. 34:	Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentale, avec et sans ventilation naturelle nocturne (2 ^{ème} essai : 15/07/2016).....	127
Figure III. 35:	Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentale, avec et sans ventilation naturelle nocturne (3 ^{ème} essai : 16/07/2016).....	128
Figure III. 36:	Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentale, avec et sans ventilation naturelle nocturne, du 14 au 16 juillet 2016.....	130

Chapitre IV : Simulation numérique

Figure IV.1 :	Vue sur la fenêtre de logiciel EnergyPlus.....	134
Figure IV.2 :	L'interface du logiciel EnergyPlus.....	134
Figure IV.3 :	Structure du logiciel Energyplus.....	135
Figure IV.4 :	Interface du sketcheup.....	137
Figure IV.5 :	Le cas d' étude modélisé avec sketch up 16.....	139
Figure IV.6 :	Les chambre (A) et (B) modélisées avec sketch up 16.....	139
Figure IV.7 :	Comparaison des températures intérieures simulées pour la chambre A et B (avec et sans ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	140
Figure IV.8 :	Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la chambre B (sans ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	142
Figure IV.9:	Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la chambre A (avec ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	143
Figure IV.10:	Variation de la température intérieure simulée avec des ouvertures de différents rapports WWR [Période estivale, journée du 14-07-2016]	145
Figure IV.11:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% en	

	changeant l' orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].....	147
Figure IV.12:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25% en changeant l' orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].	147
Figure IV.13:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38% en changeant l' orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016]	148
Figure IV.14:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50% en changeant l' orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].	148
Figure IV.15:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75% en changeant l' orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].	149
Figure IV.16:	Variation de la température intérieure simulée avec différents hauteurs [Période estivale, journée du 14-07-2016]	150
Figure IV.17:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% (Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	152
Figure IV.18:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25%(Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	152
Figure IV.19:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38%(Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	153
Figure IV.20:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50%(Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	153
Figure IV.21:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75%(Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	154
Figure IV.22:	Variation de la température intérieure simulée avec différents rapports WWR (Simple vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	154
Figure IV.23:	Variation de la température intérieure simulée avec différents rapports WWR (Double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	155
Figure IV.24:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	156
Figure IV.25:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	157
Figure IV.26:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	157
Figure IV.27:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	158
Figure IV.28:	Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	158
Figure IV.29:	Variation de la température intérieure simulée avec différents rapport WWR (Ventilation unilatérale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	159
Figure IV.30:	Variation de la température intérieure simulée avec différents rapport WWR (Ventilation transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]	159
Figure IV.31:	Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 10%). [Période estivale, journée du 14-07-2016] ...	160

Figure IV.32:	Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 25%). [Période estivale, journée du 14-07-2016] ...	161
Figure IV.33:	Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 38%). [Période estivale, journée du 14-07-2016] ...	161
Figure IV.34:	Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 50%). [Période estivale, journée du 14-07-2016] ...	162
Figure IV.35:	Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 75%). [Période estivale, journée du 14-07-2016] ...	162

Liste des tableaux

Table I.1 :	Valeurs de diffusivité α pour les matériaux de construction.....	23
Table I.2 :	Valeurs de l'effusivité b pour les matériaux de construction.....	24
Tableau II.1:	Normes et recommandation portant sur la détermination du renouvellement d'air.....	94
Tableau III.1:	Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés.....	118
Tableau III.2:	Composition des éléments de construction utilisés.....	119
Tableau III.3:	Les instruments de mesure utilisés dans l'investigation.....	120

Nomenclature

- **Abréviation :**

Notation	Signification
IHVE	The Institution of Heating and Ventilating Engineers
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
USTO	Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
PMV	Vote moyen prévisible
PPD	Pourcentage prévisible d'insatisfaits
COV	Composés organiques volatiles
QAI	Qualité de l'air intérieure
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
WWR	Rapport de la fenêtre au mur externe
DTR	Document Technique Réglementaire de construction utilisé en Algérie
DOE	Département d'Énergie des États-Unis
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning

▪ **Symbole :**

Notation	Signification	Unité
φ	Le déphasage thermique	h
f	L'amortissement	
λ	La conductivité thermique	W/m.°C
c	la chaleur spécifique	Wh/kg.°C
ρ	La densité	kg/m ³
ρc	la chaleur volumique	Wh/m ³ .°C
a	La diffusivité thermique	m ² .s ⁻¹
b	L'effusivité thermique	Wh ^{1/2} /m ² k
Y	l'admittance	W/m ² °C
Y_t	L'admittance totale d'une pièce	W / °C
D_{hc}	la capacité de la chaleur diurne	Wh/ m ² °C
U	la transmittance thermique	W / m ² .K
R	résistance thermique	m ² °C/ W
U_w	Le coefficient de transmission thermique	W/m ² .K
U_g	coefficient de transmission thermique du vitrage	W/m ² .K
U_f	coefficient de transmission thermique du cadre	W/m ² .K
Ψ_g	coefficient de transmission thermique linéique de la liaison vitrage/cadre de la fenêtre	-
S_w	Le facteur solaire	-
TL_w	Le facteur de transmission lumineuse	-
α	L'absorptivité (coefficient d'absorption)	
ρ	La réflectivité (coefficient de réflexion)	
τ	La transmissivité	
K	coefficient de déperdition surfacique	W/m ² °C
Q	Le débit de ventilation	m ³ /h
A	La surface de l'ouverture	m ²
C_d	Coefficient de décharge de l' ouverture (réduction de la vitesse de l'air à l'entrée, C_d égal à 0.6)	-
h	La hauteur de l'ouverture	m
ΔT	La différence de température entre l'extérieur et l'intérieur	K
T_{ao}	La température extérieure	K
g	L'accélération de pesanteur	m/s
V_{eff}	La vitesse moyenne à travers une moitié de l'ouverture	m/s
c_1	Un coefficient adimensionnel fonction du type d'ouvrant ($c_1 \approx 0.001$)	-
c_2 et c_3	Sont des coefficients affectant le tirage thermique et l'effet du vent ($c_2 \approx 0.0035$, $c_3 = 0.01$)	-
v_r	La vitesse moyenne du vent	m/s
H	La hauteur de l'ouvrant	m
ΔT	L'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur	K
A_w	L'aire effective de l'ouvrant	m ²
ACH	Le taux de renouvellement d'air	v/h
v	Le volume de la pièce	m ³

Introduction générale

Avant l'ère des combustibles fossiles bon marché, au cours de laquelle se sont généralisés les moyens modernes de chauffage et d'air climatisé, les bâtiments traditionnels prenaient soigneusement en compte les éléments climatiques locaux¹. Nos ancêtres construisaient avec des matériaux locaux qui sont toujours présents dans leur environnement immédiat. Ils utilisaient avec bon sens, des ressources naturelles comme : le soleil, le vent, la végétation et la pluie pour créer des conditions confortables et saines à l'environnement intérieur de leurs constructions.

Assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur, c'est entre autres satisfaire les besoins des occupants, donc assurer leur confort². En outre, en saison chaude ou froide, la plus essentielle motivation d'un concepteur est de rehausser le niveau du confort des occupants dans les bâtiments, tout en améliorant leur rendement énergétique afin de réduire les consommations d'énergies liées au chauffage et au refroidissement.

Dans les zones à climat chaud et aride qui sont caractérisé par des fortes températures en été, le recours à des installations actives (système de refroidissement et appareil de climatisation) pour produire du froid et atteindre une situation de confort acceptable à l'intérieur des bâtiments s'avère indispensable pour procurer une sensation de bien-être et assurer un bon confort thermique d'été. Or, ces appareils consomment beaucoup d'électricité, ils impactent sur la consommation d'énergie électrique des bâtiments et sur la qualité de l'air intérieur. De plus, les systèmes de climatisation ont un effet néfaste sur l'environnement (dégagement du CO₂). Ils sont l'une des causes d'inconfort respiratoire à l'intérieur des bâtiments.

Un besoin accru vers un confort meilleur pousse les usagers à utiliser des équipements fortement consommateurs d'énergie pour satisfaire leur besoin³. Le sud Algérien, et vue l'aridité du climat, les bâtiments sont responsable de plus que 70% de la consommation de l'électricité en période estivale, la solution consiste à installer une climatisation électrique dans chaque local pour assurer le confort estival⁴. La recherche du confort thermique et plus particulièrement le confort d'été devient un facteur de préoccupation pour les concepteurs dans la conception des bâtiments, ainsi que pour les usagers.

¹ Chatelet, P. Fernandez et P. Lavigne. (1998) « Architecture Climatique, Une Contribution Au Développement Durable. Tome 2 Concepts et Dispositifs ».

² D. Watson et R. Camous. (1979) « L'Habitat Bioclimatique, De la conception à la construction ».

³ A. Ouertani et N. Ghrab. (2001) « Influence des Scénarios Énergétiques et Économiques sur les Performances Comparatives de Variantes de Bâtiments, Morcos ».

⁴ N. Fezzioui et al. (2008) « Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien ».

Les constructions en mass se servent de matériaux lourds (pierre, brique, terre crue,...), elles sont souvent caractérisé par une forte inertie due à l'épaisseur des murs. En journée chaude d'été, un mur de forte épaisseur a un rôle particulier de stockage énergétique. Il accumule la chaleur du soleil et la restitue plus tard, c'est-à-dire la nuit, lorsqu'il fait frais à l'extérieur. Il a la fonction inverse pendant la nuit : il accumule cette fois-ci la fraîcheur de l'extérieur pour la restituer le jour.

(Mohammad Arif Kamal, 2011) déclare que «la masse thermique est particulièrement bénéfique lorsqu'il y a une grande différence entre les températures extérieures de jour et de nuit surtout dans le climat chaud et sec. D'après (Bencheikh Hamida,2007) les régions à climat chaud et aride qui nous intéressent particulièrement, sont caractérisées par un écart de température très important entre la nuit et le jour (10 à 15°C environ). Les températures nocturnes étant "douces" ou même "fraîches" l'homme dispose d'une source de frigories. Une idée simple qui vient à l'esprit est de stocker ces frigories de l'air nocturne et de les restituer pendant la journée afin d'obtenir un rafraîchissement de l'air intérieur pendant la phase diurne.

L'enveloppe extérieure des bâtiments n'est pas le seul élément interagissant avec le climat. Les parois transparentes sont aussi des éléments y participant. Les fenêtres jouent un rôle prépondérant pour créer un environnement intérieur confortable. Elles sont considérées comme des moyens passifs qui séparent l'environnement extérieur de l'environnement intérieur, elles permettent de rafraîchir et adoucir l'air à l'intérieur et d'évacuer la chaleur excédentaire du bâtiment pendant la nuit en période estivale.

De nombreux chercheurs ont indiqué que la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment dépend de plusieurs paramètres de ce dispositif d'ouverture, notamment l'orientation de la fenêtre, la forme, la position, type et propriété du vitrage, la dimension et le dispositif d' occultation.

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre des efforts menés pour maîtriser l' impact de la fenêtre sur le comportement thermique et respiratoire dans les constructions à forte inertie dans les zones chaudes et arides, tout en assurant une qualité des ambiances intérieures satisfaisantes en fonction des besoins des occupants. L'analyse des performances se fera en périodes chaude, à la fois expérimentalement et numériquement, sur les paramètres physiques mesurés.

1-Problématique

Avec les préoccupations actuelles d'économies d'énergie, de maîtriser les impacts du bâtiment sur l'environnement extérieur et d'assurer le confort des utilisateurs en hiver comme en été, les concepteurs devront assurer une bonne conception thermique du bâtiment. Ils devront intervenir dès la conception des bâtiments pour créer des ambiances intérieures confortables. Une bonne conception architecturale est exigée par la RT2012 au travers d'une limitation des besoins d'énergie liés au chauffage et au refroidissement.

Dans notre climat chaud et aride et avec le changement climatique, qui allonge les périodes de chaleur, le confort d'été devient un problème majeur. Durant la période de canicule, la chaleur excessive qui caractérise les villes sahariennes (sud algérien) en général et précisément la ville de Laghouat (région d'étude) constitue la plus grande menace de l'enveloppe thermique du bâtiment qui cause l'inconfort thermique.

La ventilation naturelle, dont le rôle est d'assurer un air sain et confortable, est un point clé qui revêt de plus en plus d'importance pour améliorer les performances du bâtiment. Ceci a été déjà utilisé auparavant dans l'architecture vernaculaire à travers le monde.

Les bâtiments anciens sont souvent caractérisés par une forte inertie. L'inertie thermique est pourtant un élément prépondérant de la gestion des ambiances thermiques intérieures, elle permet de disposer de conditions confortables en été et de réduire les consommations liées à la climatisation.

En été, ces masses à inertie, refroidies pendant la nuit grâce à la ventilation nocturne (ouverture des fenêtres), en utilisant la plus faible température extérieure comme un dissipateur de chaleur, se réchaufferont lentement participant ainsi à maintenir la fraîcheur intérieure du matin plus longtemps.

Les fenêtres sont considérées comme des moyens passifs pour gérer le flux thermique et l'air frais. Ces dispositifs d'ouvertures séparent l'environnement extérieur de l'environnement intérieur, elles jouent un rôle important dans la performance thermique du bâtiment.

La fenêtre a un effet significatif sur la consommation énergétique globale du bâtiment. Le flux de chaleur à travers une fenêtre vitrée contribue au gain de chaleur dû au rayonnement solaire incident qui augmente éventuellement la charge de refroidissement⁵. Par conséquent

⁵ TsunKe M et al.(2013) «Analysis of building energy consumption parameter and energy savings measurement and verification by applying eQuest software» .

pour éviter les phénomènes de surchauffe en été, les fenêtres devront rester fermées pendant la journée. Une bonne ventilation nocturne permettra une descente en température du bâtiment, ce qui donne une sensation de fraîcheur. Pour cela, les fenêtres seront ouvertes de manière à créer une circulation naturelle de l'air à travers le bâtiment.

Ceci nous emmène à poser les questions suivantes :

- **De quelle manière intervient la fenêtre dans l'amélioration du confort thermique et respiratoire des usagers dans les constructions à forte inertie en zone chaude et aride ?**
- **Comment améliorer le confort thermique et respiratoire interne dans les constructions à forte inertie durant la période estivale (surchauffe)?**
- **Quelles sont les configurations les plus importantes de la fenêtre à adopter pour améliorer le confort thermique et respiratoire à l'intérieur d'une construction à forte inertie ?**

2-Hypothèses

Pour mieux cerner le problème et maîtriser le champ de notre problématique, nous avons formulé l'hypothèse suivante :

« Durant le jour en période estivale, les fenêtres impactent directement le comportement thermique des constructions (gains de chaleur), en revanche, elles assurent l'aération et la qualité de l'air intérieure pendant la période nocturne (évacuation de la chaleur cumulée) »

Cette hypothèse est en pratique décomposée en trois hypothèses secondaires qui sont :

- 1) Les grandes fenêtres n'offrent pas une bonne performance thermique contrairement aux petites ouvertures.
- 2) L'orientation sud de la fenêtre est la plus favorable en été pour l'abaissement de la température intérieure.
- 3) Un bâtiment à forte inertie, associé à une gestion de ventilation naturelle nocturne possède un confort d'été meilleure qu'un bâtiment à forte inertie non ventilé.

3- Objectifs

La température et la qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment sont des éléments primordiaux pour le bien être de ses utilisateurs, notamment dans les constructions à forte inertie. Les éléments de l'enveloppe du bâtiment interviennent directement dans le régime du processus d'échange thermique et aéraulique entre l'ambiance intérieure et celle de l'extérieure. La quantité du flux de chaleur et d'air frais, qui passent à travers les fenêtres dépend de plusieurs paramètres.

L'objectif principal du présent mémoire consiste à évaluer les ambiances thermiques (température d'air intérieure) et respiratoires (débit de ventilation & taux de renouvellement d'air/heure) intérieures générées par la fenêtre dans les constructions à forte inertie, à fin de déterminer les différents paramètres optimaux de ce dispositif favorisant un espace confortable en fonction des besoins des occupants.

Ces évaluations seront effectuées sur la base de deux aspects distincts:

- Le premier aspect touche le flux de chaleur qui pénètre à travers la fenêtre et son impact sur la température d'air intérieure et le confort thermique.
- le deuxième aspect concerne la qualité de l'air intérieur procurée par ce dispositif d'ouverture et par conséquent son impact sur le confort respiratoire.

4- Méthodologie et structure de la recherche

La présente recherche est structurée en deux parties distinctes, précédées par une partie introductive et suivies par une conclusion générale. Afin d'aboutir à l'objectif fixé qui consiste à évaluer les ambiances thermiques et respiratoires intérieures générées par la fenêtre dans les constructions à forte inertie, et de vérifier les hypothèses émises. La première partie est basée sur une recherche bibliographique et documentaire qui permet une meilleure compréhension des connaissances ayant une relation avec la recherche. Dans la deuxième partie, nous avons eu recours à l'usage de deux outils de recherche qui sont :

- **L'investigation** à travers les mesures in situ à l'aide d'instrumentation technique.
- **Une évaluation numérique** des résultats à l'aide d'un logiciel informatique.

L'investigation va se tenir sur la période estivale, afin de déterminer la vitesse du vent, les températures d'air intérieures et extérieures d'une chambre d'hôtel (à forte inertie) aux

différentes heures de la journée, grâce à une Station météorologique, un hygro-thermographe et un thermomètre digital a sonde intégrée, avec une prise de photos simultanée.

La simulation à l'aide du logiciel informatique « EnergyPlus » version 8.4.0 aura pour rôle de choisir les solutions permettant d'obtenir une ambiance intérieure confortable pendant la saison estivale. À travers : Certaine optimisation au niveau des fenêtres afin de généré une ventilation naturelle (nocturne) pour rafraîchir l'air intérieur et évacuer la chaleur emmagasinée dans les parois pendant la journée.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres ;

- **Le premier chapitre** fait un état de l'art de la caractérisation de l'inertie thermique et son intérêt dans la construction en climat chaud et aride.
- **Dans le second chapitre**, nous avons essayé de définir la fenêtre, de préciser les différentes fonctions et types de fenêtres et d'évaluer les ambiances intérieures générées par la fenêtre.
- **Le troisième chapitre** concernera l'étude expérimentale, dans les conditions climatiques de la région de Laghouat. Les résultats obtenus sur la chambre expérimentale ont permis d'évaluer l'impact de la fenêtre sur le confort thermique des usagers.
- Enfin, **le quatrième chapitre** fera l'objet de la simulation numérique et l'interprétation des résultats.

Le mémoire se conclue par une récapitulation des principaux résultats de ce travail. Quelques suggestions de travaux futurs seront également proposées.

I

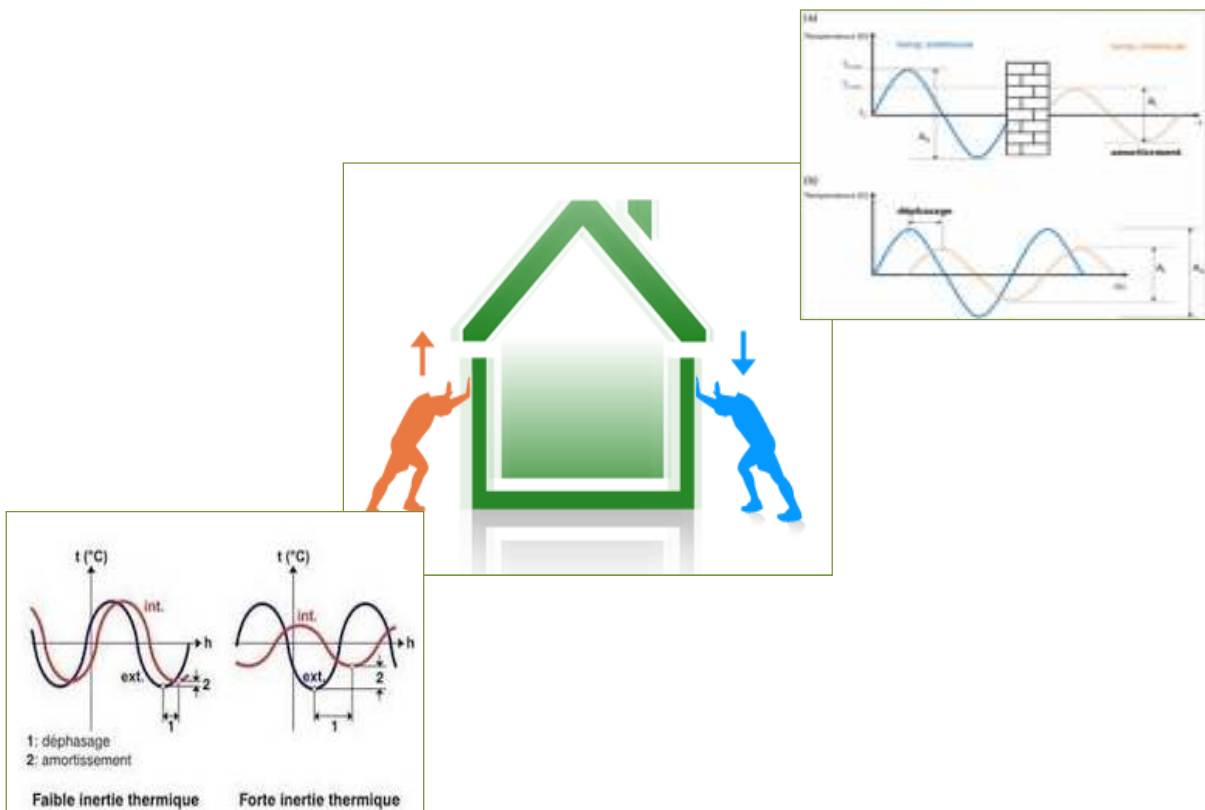
CORPUS THEORIQUE

PREMIERE PARTIE

01

GÉNÉRALITÉS SUR L'INERTIE THERMIQUE DES CONSTRUCTIONS

CHAPITRE 01



Introduction

Ce premier chapitre a permis de dresser un aperçu théorique et quelques études expérimentales rapportées dans la littérature sur des connaissances de base ayant une relation avec la caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments qui possède une grande influence sur l'amélioration du confort d'été, notamment dans les régions à climat chaud et aride.

Dans un premier temps nous présenterons quelques exemples d'application de l'inertie thermique dans l'architecture vernaculaire.

Par la suite, nous chercherons à définir ce qu'est l'inertie thermique, et en comprendre les fondements et quelques rappels théoriques de cette propriété des bâtiments.

Enfin, nous décrivons les paramètres influençant la performance de l'inertie thermique. Puis nous traiterons quelques travaux expérimentaux qui évaluent l'efficacité de l'inertie thermique et son intérêt pour le confort d'été sous différents climats chauds ainsi que certaines études évaluant le potentiel de la ventilation naturelle nocturne et son influence sur la performance de l'inertie thermique.

I.1- Exemples d'application de l'inertie thermique dans l'architecture vernaculaire

L'architecture vernaculaire a été développée et utilisée à travers des siècles par de nombreuses civilisations à travers le monde. (Manoj Kumar Singh et al,2008) Différentes civilisations anciennes ont produit leurs propres styles architecturaux traditionnels et adaptées aux conditions locales. Peu à peu développés au cours des âges et sans l'utilisation de dispositifs artificiels de production d'énergie, ces bâtiments ont fourni divers niveaux de confort à l'intérieur de l'espace bâti. (S.Plemenka,1982)

L'architecture vernaculaire est un terme utilisé pour catégoriser les méthodes de construction qui utilisent les ressources disponibles localement pour répondre aux besoins locaux (C.Helena,1998). Elle établit une harmonie entre les habitations, les habitants et l'environnement physique (Rana Soleymanpour et al, 2015), donc elle pourrait être considéré comme une architecture bioclimatique primitive.(Silvia Martin et ignacio canas, 2005)

L'architecture troglodytique, l'architecture massive et l'architecture des igloos sont des illustrations de cette architecture vernaculaire, utilisant l'inertie thermique pour s'adapter à la rigueur du climat.

I.1.1- L'architecture troglodytique

L'habitat troglodyte est considéré comme l'une des plus anciennes architectures vernaculaires. Cet habitat recouvre l'ensemble des habitations situées dans le sol, organisées soit des cavités naturelles soit creusées par l'homme (J.L.Izard, et A. Guyot, 1979). Un habitat creusé dans le sol aura un régime de température intérieure très stable, aussi bien en regard des écarts de température jour-nuit que des amplitudes annuelles (été-hiver).

« La recherche de l'inertie maximale d'une maison conduit à enterrer celle-ci. La masse de terre qui contribue à l'échange thermique devient immense, tend vers une grandeur infinie...Ce type d'architecture souvent très méconnu reste cependant très riche, vivant, et son aire de développement se trouve sous toutes les latitudes, tous les climats quelques soit les conditions de sols ». (JeanPaul Loubes,1988)

Sous un climat sec à températures extrêmes, chaud et froid, on peut observer la stratégie qui consiste à se servir de l'inertie thermique du sol en enterrant les habitats pour se protéger des amplitudes thermiques. (S.Courgey et J.P.Oliva, 2006)

L'habitat enterré se caractérise par la disparition de façade exposée à l'extérieur et par une augmentation considérable de l'inertie thermique de l'enveloppe grâce à la présence du sol lui-même. Ainsi l'amplitude de température journalière est totalement ignorée, l'amplitude annuelle des températures extérieures est la seule grandeur qui ait une influence sur le comportement de l'ambiance intérieure tout en subissant un amortissement et un déphasage qui dépendent de l'importance de la masse totale de matériaux mis en œuvre. Les propriétés thermiques d'un tel habitat varient en fonction de la nature du sous sol plus ou moins isolant, selon son épaisseur et en fonction de son exposition. (A. Liebard. et A. De Herde, 2005)

Matmata en tunisie, Les « yaodong »maisons troglodytes de la Chine du nord,cappadoce et Dara en turquie, Kandovan en Iran, Cliff Palace parc national de Mesa Verde Colorado,Aputia en Italie et Andalusia en Espagne en sont des illustrations.



Figure I.1 : habitations troglodytes de la Cappadoce en turquie. [<http://blog.tracedirecte.com/>]



Figure I.2 : Maison troglodyte de kandovan, en Iran. [<https://artbite.fr/-Auto-construction>]

D'après (A. Liebard. et A. De Herde, 2005) à Matmata en Tunisie, on rencontre des habitations construites autour d'un puits central d'environ dix mètres de profondeur. Les pièces de vie sont construites autour de ce patio, parfois sur plusieurs niveaux. L'accès se fait par un tunnel en pente. Dans un climat chaud et aride comme celui de la Tunisie, les avantages du patio souterrain sont multiples : inertie thermique du sol, réduction de l'exposition au soleil par un ombrage maximal, stratification de l'air avec réservoir d'air frais au fond du patio, réduction de l'exposition aux vents, et aux poussières.



Figure I.3 : L'architecture troglodytique « Matmata » en Tunisie. [<http://maison-monde.com/>]



Figure I.4 : Vue intérieure d'un espace troglodytique à Matmata. [L'architecture traditionnelle en tunisie : l'habitat rural(naceur baklouti)]

I.1.2- L'architecture massive

Les bâtiments massifs existent dans de nombreuses régions du monde avec une variété de types de climat, mais pas toujours pour les mêmes raisons (C. Diaz, 1994).

En raison de leur capacité à stocker et à rayonner la chaleur, et de réduire l'infiltration en créant une enveloppe serrée, Les structures massives étaient les habitations vernaculaires les plus courantes observées dans les climats froids. Cependant, des habitations massives ont également été trouvées dans des climats désertiques avec des variations de température diurnes extrêmes. En tenant compte l'épaisseur appropriée, une enveloppe massive inversera la température extrême du climat désertique à l'intérieur d'une habitation, Transférer la chaleur absorbée de l'extérieur au cours de la journée dans la structure pendant la nuit, et ensuite faire le contraire pendant la nuit. (Zhiqiang (John) Zhai et Jonathan M. Previtali, 2010)

Dans les régions de climat chaud et sec, les écarts de température sont souvent très grands, et les maisons sont serrées les unes contre les autres pour obtenir de l'ombre et diminuer la surface murale exposée au soleil ; souvent en pierre, ou en terre, les murs et les toits épais assurent une bonne inertie thermique et présentent de petites ouvertures peu nombreuses. Une cour intérieure ombragée, avec de la verdure et parfois de l'eau, peut augmenter la fraîcheur des pièces.¹

Les anciennes villes des régions arabes d'Asie et d'Afrique du Nord sont des exemples typiques de l'utilisation traditionnelle de l'effet de l'inertie thermique à la fois sur le plan individuel et urbain.(C. Diaz, 1994)

La maison mozabite, La maison iranienne, La maison traditionnelle palestinienne et celle de Yémen, où l'usage de matériaux massifs et lourds adaptés à l'environnement comme la pierre et les blocs de terre...etc. L'épaisseur des murs assure une grande inertie thermique. Elle tend à modérer la température intérieure, dans un milieu climatique soumis à de très grandes variations de température, en freinant la pénétration de la chaleur pendant la journée et en la restituant utilement la nuit.

¹ <http://www.larousse.fr/encyclopedie/>



Figure I.5:Habitat à cour avec l'iwan à Gaza. [Khasawneh, 2001]

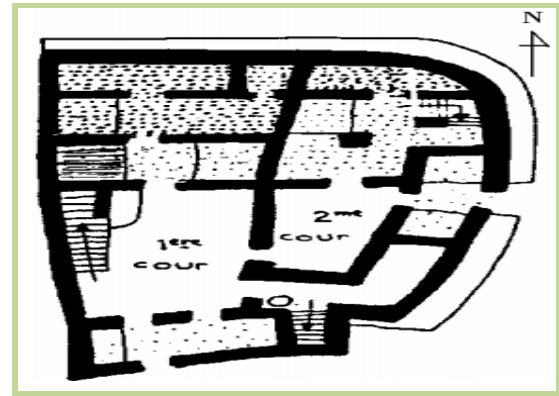


Figure I.6: Plan d'une habitation traditionnelle iranienne. [G, J.M Alexandroff,1982]

D'après (Christian Bousquet,1986) dans les ksour traditionnels mozabites, en été les terrasses deviendront inconfortables dans la journée à cause de la chaleur et de la luminosité réverbérée, il faudra attendre la nuit tombée pour y profiter des bienfaits des écarts de température, alors que le amesentidar qui a accumulé la chaleur de la journée dans ses murs apparaît intenable. Au matin le rez-de-chaussée aura été rafraîchi par les courants d'air de la nuit et connaîtra l'activité diurne d'été.



Figure I.7 : A- Plan d'une habitation traditionnelle mozabite. B-Vue Axonométrique

[Christian Bousquet,1986]

1.1.3- L'architecture des igloos

L'igloo des esquimaux de l'Arctique, était une habitation d'hiver utilisée par les Inuits . Les Inuits peuple ont trouvé une réponse particulièrement bien adaptée au climat polaire. Ils choisissent toujours un site abrité du vent pour leurs villages. La forme même de l'igloo, demi-sphérique, facilite l'écoulement des vents violents. L'unique entrée est un tunnel incurvé, protégé par un mur bas de blocs de neige qui empêche le vent de s'y engouffrer. Toutes les chambres de l'habitation sont reliées à la salle commune par un tunnel, pour éviter les

dépertitions de chaleur. Dans le tunnel s'ouvrent des salles de transition où l'air se réchauffe. Le sol des chambres est surélevé pour profiter au maximum de l'air chaud. ²

Les trous de ventilation sont indispensables afin de permettre le renouvellement de l'air à l'intérieur de l'igloo. Dans certains igloos l'intérieur est quadrillé avec des peaux de bêtes, ce qui permet d'augmenter la température de presque 20 °C. Les Inuits se chauffent aussi en brûlant de la graisse de baleine. Même par une température de -40 °C, celle au sol à l'intérieur de l'igloo est de 0° C. ³

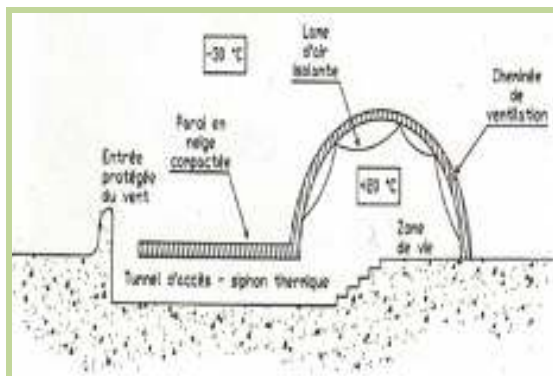


Figure I.8 : conception intérieure de l'igloo.

[Slimani amar, 2012]



Figure I.9: Architecture de l'igloo.

[<https://fr.wikipedia.org>]

(J.M.Fitch et D.P.Branch , 1960) affirme que « le dôme hémisphérique de l'igloo offre une résistance maximale et un minimum d'obstruction aux assauts du vent; dans le même temps il expose la surface la plus réduite à leurs effets refroidissant. Le dôme résume la meilleure façon de sortir le plus grand volume en mettant en œuvre la plus petite structure; cette disposition permet un chauffage maximal à partir d'une source de chaleur radiante produite par une lampe à huile ».

A travers ces exemples de l'architecture vernaculaire, on constate que la propriété de l'inertie thermique de l'enveloppe est d'une importance cruciale pour le maintien du confort intérieur.

² <http://www.larousse.fr/encyclopedie/>

³ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Igloo>

I.2- Caractérisation de l'inertie (Quelques rappels théoriques)

I.2.1- Concepts et définitions

L'inertie thermique dans les bâtiments est une notion difficile à appréhender et à définir. (Fabio Munaretto, 2014), elle est un terme souvent employé pour caractériser la capacité de stockage thermique propre à la structure et/ou aux parois internes des bâtiments. (Adrien Brun, 2011)

De son côté (J.L. Iazard, 2006) définit l'inertie thermique comme la propriété d'un bâtiment à s'opposer aux variations de température. L'inertie thermique s'opposerait donc aux effets des sollicitations sur les fonctions d'état de l'ambiance intérieure.

En mai 2003, à Montpellier, dans un colloque intitulé « l'Inertie thermique en climat méditerranéen. Confort et consommations d'énergie », (Olivier Sidler, 2003) définit l'inertie thermique comme suit : « L'inertie d'un bâtiment est une fonction directe de sa capacité thermique, donc du produit de la masse de tous ses composants par leur chaleur spécifique massique. Cette capacité thermique, pour autant qu'elle soit correctement mise en œuvre (c'est à dire en respectant certaines surfaces d'échange), agit concrètement comme un amortisseur, c'est à dire qu'elle tente de s'opposer à toutes les variations brutales de température. Mais c'est aussi, comme un amortisseur, un grand absorbeur d'énergie »

L'inertie thermique prend en compte deux facteurs importants: le déphasage thermique et le facteur d'amortissement.

(H. Asan et Y.S. Sancaktar, 1998) investiguent les effets des propriétés thermophysiques du mur sur le temps de déphasage et le facteur de décrémentation, et donnent une définition de ces concepts: « Pendant le processus transitoire, dans le quel la température extérieure change pendant la période d'un jour, une onde de flux de chaleur traverse le mur de l'extérieur à l'intérieur. L'amplitude de cette onde présente des magnitudes de température, et sa courte longueur d'onde présente un temps. Pendant la propagation de cette onde thermique à travers le mur, son amplitude diminuera selon les propriétés thermo-physiques de matériau du mur. Quand cette onde atteint la surface intérieure, il y aura une amplitude qui est considérablement plus petite que la valeur qu'il y est à l'autre surface. Le temps que prend l'onde thermique pour se propager de la surface externe à la surface interne est nommé « le temps de déphasage » ou décalage de la phase et la proportion décroissante de son amplitude pendant ce processus est nommé « le facteur de décrémentation » ou facteur d'amortissement ».

Le déphasage thermique (noté ϕ), appelé également décalage temporel, représente le temps de réponse entre un pic de chaleur extérieur et celui engendré à l'intérieur pour une paroi donnée. Il est donné en heures.⁴ Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à retarder les variations de température. Plus le déphasage est élevé, meilleur est le confort thermique car les variations de la température extérieure se ressentent beaucoup moins rapidement à l'intérieur. Un déphasage élevé ne suffit pourtant pas à assurer seul le confort thermique, l'inconfort arrivera seulement un peu plus tard.⁵

Sa formule est donnée ci-dessous d'après M. Evans en 1980:

$$\Phi = 1.38 e \sqrt{1/a} \dots\dots\dots \text{Eq I- 1}$$

Avec : Φ déphasage (s), e épaisseur (m), a diffusivité thermique (m^2/s)

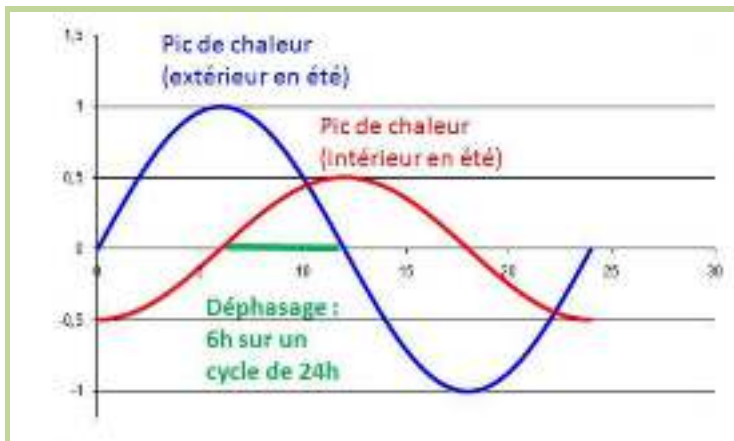


Figure I.10: Le déphasage thermique.

[Gwenan ingénierie ,2012]

L'amortissement (noté f) est la relation entre la fluctuation maximale de la température intérieure et extérieure. Plus la valeur est élevée, meilleur est le confort thermique. Car les variations de la température extérieure se ressentent moins à l'intérieur.⁵

Son expression se calcule suivant la relation ⁶:

$$f = A_i / A_e$$

$$f = T_{i \max} - T_{i \min} / T_{e \max} - T_{e \min} \dots\dots\dots \text{Eq I- 2}$$

⁴ Gwenan Ingénierie. (2012) « Caractéristique thermique dynamique, physique du bâtiment ».

⁵ Pierre Delot. (2015) « Confort d'été : Déphasage thermique et amortissement Diffusivité et effusivité ».

⁶ H. Asan.(2006) « Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials».

Ou :

A_i et A_e sont les amplitudes de l'onde dans les surfaces interne et externe de la paroi, respectivement.

Selon (Luigi Marletta et al.,2013), l'amortissement rapporte l'amplitude de l'oscillation de température externe cyclique agissant sur le mur au flux de chaleur périodique libéré dans l'air intérieur.

L'amortissement ou effet isolant est plutôt le rapport de l'amplitude de la variation quotidienne de la température extérieure sur l'amplitude de la variation quotidienne de la température intérieure. S'il ne contient pas d'isolant, le matériau joue un rôle important avec son épaisseur sur le déphasage variant que sur l'amortissement. Cette influence sur le déphasage est d'autant importante, si le matériau a une masse volumique et chaleur massique importantes. Or le matériau isolant joue un rôle important sur l'amortissement du bâtiment et assez faible sur le déphasage. Cette influence sur l'amortissement est d'autant très importante si le matériau a une conductivité thermique faible (polystyrène, laine de verre). (G.solange,2004).

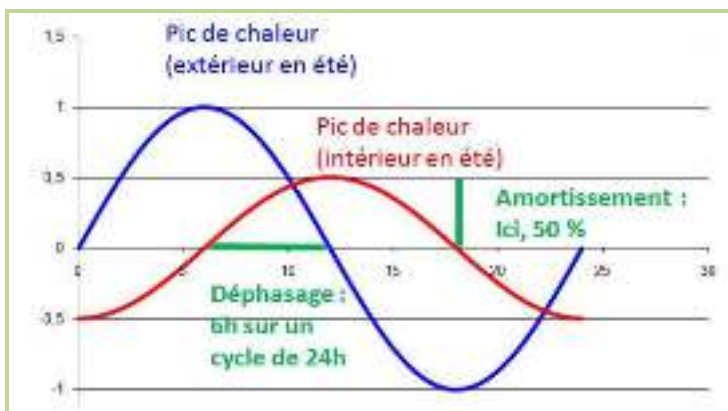


Figure I.11: L' amortissement.

[Gwenan ingénierie ,2012]

L'inertie d'un bâtiment ou une paroi représente son aptitude à stocker de la chaleur. Pour un bâtiment elle s'exprime généralement par l'appartenance à une classe d'inertie (de « très faible » à « très forte »). Pour une paroi, elle s'exprime en Wattheure par mètre carré Kelvin ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{K}$).

Plus l'inertie est forte, plus la paroi (ou le bâtiment) est capable de stocker de la chaleur ou de restituer de la fraîcheur.⁷

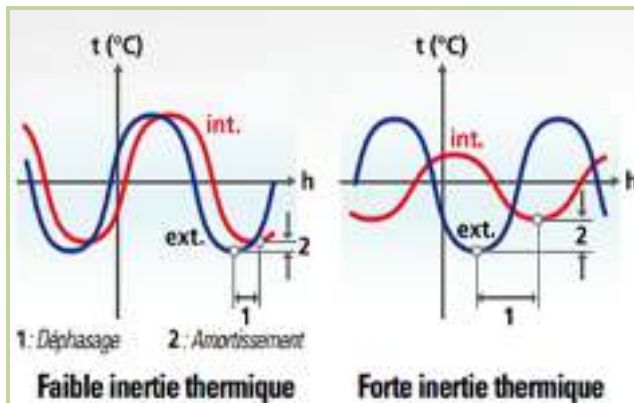


Figure I.12 : Le déphasage et l' amortissement dans un bâtiment à forte inertie et dans un bâtiment à faible inertie.

[www.energieplus-lesite.be]

(E.Shaviv ,1984), (B.Givoni, 1991) et (J.L.Izard,1991) ont évoqué que les parois épaisses sont satisfaisantes le jour quand la température externe est supérieure à celle de l'intérieur. Mais la nuit la forte inertie permet d'emmagasiner puis restituer la chaleur lorsque la température extérieure est baissée.

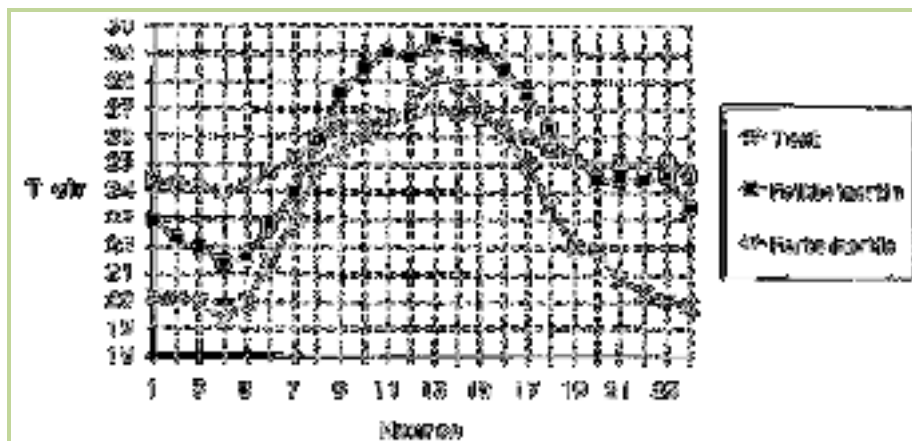


Figure I.13 : Effet de la forte inertie [J.L. Izard, 1991]

I.2.2- Principes de l' inertie thermique

Trois principes physiques stipulent la forme dans laquelle l'inertie thermique peut affecter la réponse thermique d'un bâtiment et qui sont le transfert de la chaleur, la distribution de la chaleur et le stockage de la chaleur. (G.solange,2004)

⁷ Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey.(2006) « La conception bioclimatique: des maisons confortables et économes ».

En principe, tout bâtiment dans un endroit sera soumis à ces trois processus d'une manière ou d'une autre. Selon le type de source de chaleur, la chaleur sera transportée sur les surfaces du bâtiment où certaines seront absorbées et certaines seront réfléchies en fonction des caractéristiques de la surface. Une fois que la première fraction de chaleur a été livrée dans le bâtiment, les mécanismes de transfert de chaleur, de distribution et de stockage de chaleur commenceront à se dérouler en fonction des caractéristiques thermophysiques de la masse du bâtiment et de l'environnement extérieur. (C.Diaz,1994)

I.2.2.1- Transfert de chaleur

Les mécanismes de transfert de chaleur entre les surfaces sont régis par trois principes thermiques: conduction, rayonnement et convection. (C.Diaz,1994)

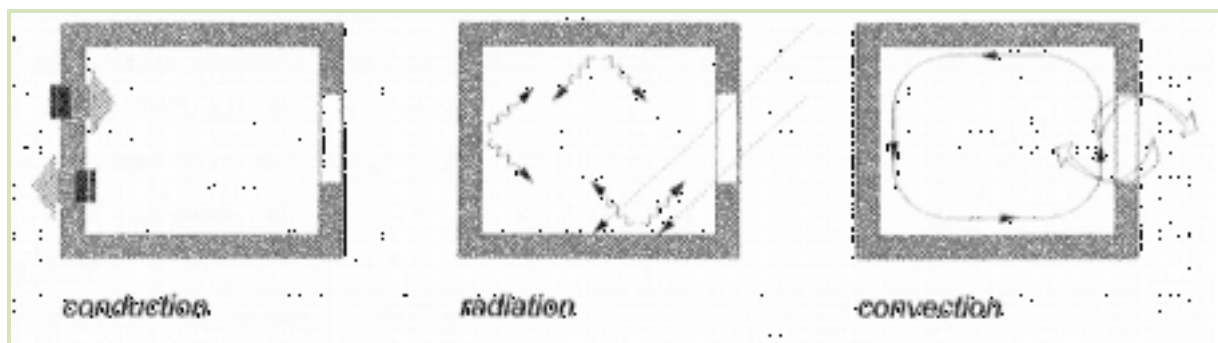


Figure I.14 : Mécanismes de transfert de chaleur à travers et entre les éléments de construction.

[C.Diaz,1994]

Le transfert de chaleur par conduction se produit à travers le contact entre les particules de la masse qui transmettent une unité de chaleur pour chaque fraction de l'augmentation de température. La vitesse de ce transfert est déterminée par l'amplitude de flux thermique sur la surface et par la conductivité et la chaleur spécifique du matériau. Le transfert de chaleur par conduction est également associé aux échanges thermiques entre les corps en contact direct avec les surfaces du bâtiment telles que les personnes et les meubles en contact avec le sol.

En régime permanent, le paramètre le plus commun pour mesurer la quantité de chaleur transférée par conduction entre l'air des deux côtés est la valeur U . Dans des conditions de variations périodiques, le taux de transfert de chaleur par conduction variera à chaque instant de décalage de température. Dans ces conditions, le transfert de chaleur par conduction déterminera le délai associé au flux de chaleur à travers un élément massif. Dans des conditions de faibles vitesses de ventilation, l'effet de la masse thermique sur les températures

ambiantes dépendra en grande partie du contrôle du mécanisme de transfert de chaleur par conduction. (C.Diaz,1994)

Le mécanisme du transfert de chaleur commence pendant le jour, quand la température du mur externe augmente, par suite de l'équilibre thermique entre le gain causé par la radiation solaire incidente et les pertes par convection et radiation. Avec le temps, une quantité de chaleur est absorbée par le mur et la température augmente selon les propriétés thermiques du matériau et les conditions de sa surface. La chaleur se déplace, alors, à travers le mur, vers la surface intérieure. Pendant la nuit, comme la température extérieure diminue et il n'y a aucune radiation solaire, un processus inverse aura lieu. D'où, la température du mur décroît en dépendant encore des propriétés thermiques du matériau et les conditions de sa surface. Tout flux de chaleur se déplace de l'endroit de plus haute température vers celui de basse température, avec un effort d'atteindre l'équilibre. La plus grande vitesse du vent extérieur augmente les pertes de convection (G.solange,2004). De la même façon, sur la surface interne du mur, en accentuant le mouvement de l'air, les pertes de la chaleur et la dissipation de la chaleur emmagasinée augmentent. (Santamouris and Asimakopoulos Ed, 1996)

I.2.2.2- Stockage de chaleur

L'usage de la masse thermique pour le stockage de la chaleur dans les bâtiments peut avoir double utilité. Pendant les saisons de chauffage, la masse thermique peut stocker la chaleur désirée, qui peut être utilisée plus tard quand la température extérieure décroît. Pendant les saisons de climatisation, elle peut aussi temporairement détenir l'excès de chaleur non désirée qui peut être évacué plus tard dans la journée (G.solange,2004).

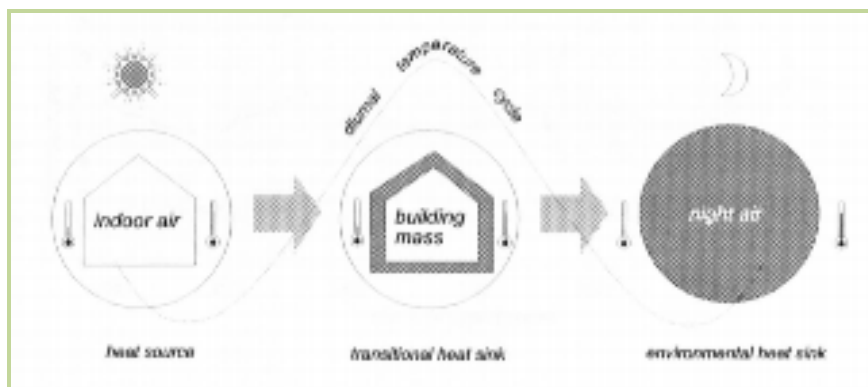


Figure I.15 : Le processus de stockage et de dissipation de la chaleur dans un cycle diurne.

[C.Diaz,1994]

Les propriétés principales des matériaux qui sont en rapport avec le processus de stockage de la chaleur sont la conductivité thermique (λ), la chaleur spécifique (c) et la densité (ρ). Comme c'est mentionné auparavant, plus grand est le produit de $\lambda c \rho$, plus grands, seront la capacité thermique et le stockage du matériau.

Selon (G.solange,2004) l'efficacité du stockage thermique dépend de plusieurs paramètres, tel que les propriétés des matériaux, la surface d'échange, l'épaisseur des éléments accumulateurs et leur position et orientation dans le bâtiment (comme une cloison interne ou externe) .

(C.Diaz,1994) déclare que « la température de la surface externe sera affectée par le degré du rayonnement incident, de l'orientation du bâtiment et les caractéristiques des finitions comme par exemple la couleur et la texture ».ainsi que «Le type de matériau et les conditions de la surface des éléments de construction détermineront la magnitude et la durée de ce processus ».

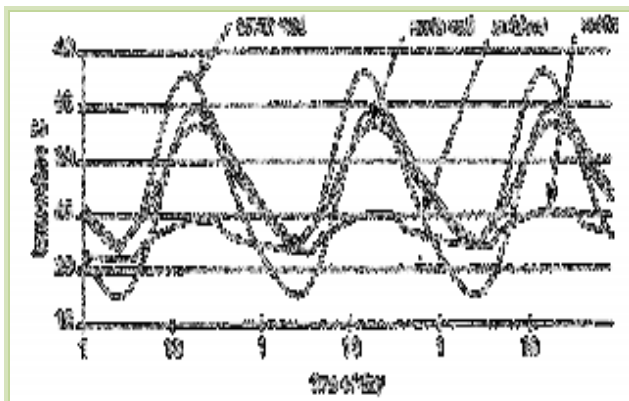


Figure I.16 : Effet de l'exposition solaire sur la température des surfaces externes.

[C.Diaz,1994]

I.2.2.3- Distribution de la chaleur

Le mécanisme de la distribution de chaleur à l'intérieur d'une pièce peut être possible soit par convection (forcée ou naturelle) ou par radiation (onde courte ou infrarouge). La plus grande quantité de chaleur émise de la surface des matériaux du bâtiment vers l'air intérieur est par radiation et une plus petite, mais importante proportion de cet échange est emportée à l'extérieur par convection (G.solange,2004).

Selon (C.Diaz,1994),la disposition des composantes du bâtiment dans l'ensemble du bâtiment déterminera la répartition de la chaleur dans la masse du bâtiment. La superficie, la géométrie, l'épaisseur, l'emplacement, la couleur, etc. des éléments sont tous des aspects qui influencent le stockage et la distribution de la chaleur dans le bâtiment.

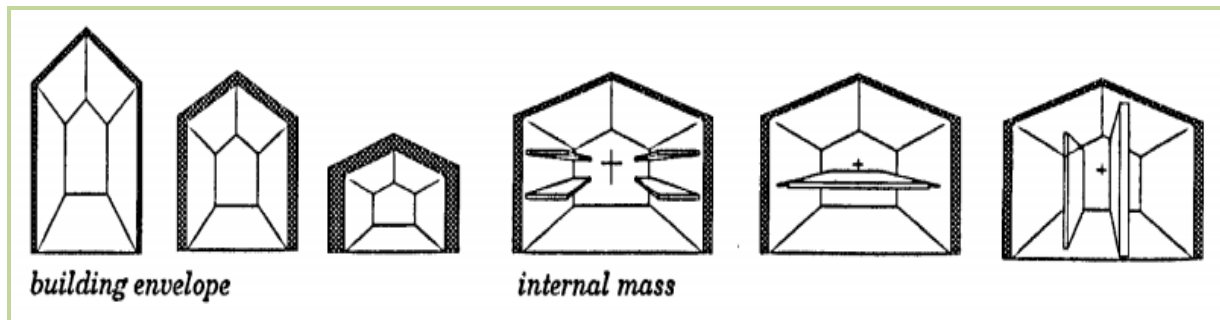


Figure I.17 : Différentes configurations spatiales résultant de diverses formes de distribution de masse à l'intérieur de bâtiments de volume de masse similaire. [C.Diaz,1994]

La convection naturelle et forcée sont essentielles pour la dissipation de la chaleur. Dans les surfaces internes du bâtiment, la chaleur est en premier conduite de la surface chaude à une couche mince intérieure adjacente. L'air a une faible capacité thermique et tend à l'augmenter surtout que la chaleur diminue sa densité. La vitesse de l'air et les variations de température sont limitées à une zone réduite à côté de la surface de la couche limite où le régime est laminaire. Cependant, selon les conditions, à quelque distance, un flux d'air turbulent peut avoir lieu. Ce phénomène déplace l'air plus frais à quelques autres endroits dans le bâtiment et résulte dans l'établissement de boucles convectives. Parfois l'accumulation intensive de l'air chaud à un point haut dans la pièce, donne une stratification de la température. (G.solange,2004).

Selon (Santamouris et Asimakopoulos, 1996) et (Balcomb, 1983) chaque fois que le mouvement d'air dû à une action de forces tout à fait gravitationnelles, le mécanisme du transfert de chaleur est connu comme convection naturelle. Mais quand le taux du transfert de chaleur est rehaussé en introduisant un flux forcé sur la surface, il est connu comme convection forcée.

Donc la distribution de la chaleur à l'intérieur des matériaux du bâtiment varie aussi avec le temps, les conditions de surface et les propriétés thermiques du matériau.

I.2.3- L'inertie thermique et les matériaux

L'inertie thermique d'un bâtiment dépend des matériaux utilisés. Ceux-ci peuvent être choisis à partir des propriétés suivantes⁸:

- La conductivité thermique λ , aptitude d'un matériau à conduire la chaleur par unité de largeur et par degré de différence de température (W/m.°C). Rappelons que la conductivité thermique λ est très liée à la masse volumique: les matériaux "légers" sont souvent des matériaux isolants alors que les matériaux "lourds" sont plutôt conducteurs.

⁸ J.L.Izard, laboratoire ABC et ENSA-marseille.(2006) « l'inertie thermique dans le bâtiment , envirobat-méditerranée ».

- La chaleur spécifique C , capacité d'un matériau à stocker la chaleur par unité de masse et par degré de différence de température ($\text{Wh/kg} \cdot ^\circ\text{C}$).
- La masse volumique ρ est une propriété importante pour approcher l'inertie thermique (kg/m^3).
- Le produit ρC représente la chaleur volumique ($\text{Wh/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$).

Un matériau inerte (ex. pierre, béton) garde longtemps sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de son équilibre thermique, et met longtemps à atteindre sa nouvelle température d'équilibre. Les matériaux constitutifs de la structure d'un bâtiment participent donc à la stabilité de sa température intérieure.⁹

L'inertie thermique est généralement associée au matériau de stockage, qui est la masse du bâtiment lui-même. En général, elle est contenue dans les murs, les cloisons, les plafonds et les planchers du bâtiment, qui sont construits de matériaux de haute capacité thermique. (Solange, 2004). Cette masse, de part sa capacité à emmagasiner de la chaleur et à la restituer en différé va participer à la fois au confort d'hiver mais aussi à celui d'été. L'hiver en évitant les sensations de parois froides et en permettant des aérations sans trop refroidir les pièces. L'été en apportant de la fraîcheur la journée, fraîcheur qu'on peut maintenir en créant des courants d'air la nuit pour évacuer les calories des murs.⁸

I.2.4- Les paramètres de l'inertie

Les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en deux grandeurs : « La diffusivité thermique » et « L'effusivité thermique ». Ces deux notions essentielles donnent des renseignements importants sur les phénomènes physiques de transferts de la chaleur à l'échelle d'un matériau.

I.2.4.1- Diffusivité thermique « a »

La profondeur que la vague de chaleur diurne atteindra à l'intérieur du matériau de stockage dépend de la diffusivité thermique. (Solange Goulart, 2004)

La diffusivité thermique notée a et s'exprimant en ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) est la grandeur qui régit le comportement thermique d'un matériau en régime transitoire, elle caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur plus ou moins rapidement. Cette grandeur peut être reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation¹⁰ :

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot c \dots\dots\dots \text{Eq I- 3}$$

⁹ CSD Azur, Domene, In Vivo. (2010) « Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne inertie thermique ».

¹⁰ Vincent FÉLIX. (2011) « Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire ».

Où:

λ : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

ρ : masse volumique du matériau (Kg/m³)

c : capacité thermique spécifique du matériau (J/kg.K)

ρc : capacité calorifique volumique (J/m³.K)

(A.Degiovanni ,1977) Définit La diffusivité thermique comme suit : «La diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps»

Un matériau ayant une conductivité thermique élevée et une faible capacité calorifique volumétrique aura une diffusivité thermique élevée.¹¹

Le transfert de chaleur à travers un matériau à haute diffusivité thermique est rapide, la quantité de chaleur stockée dans ce matériau est relativement faible et le matériau réagit rapidement aux changements de température. (Soteris .A.Kalogirou et al.,2002)

Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important».¹²

L'inertie thermique d'une paroi est définie par sa constante de temps. Ce concept a été utilisé par (B.Givoni ,1976) comme « une méthode simplifiée pour décrire la capacité de stockage thermique d'un bâtiment ». Le temps mis par un changement dans la température de surface pour arriver à une certaine profondeur du composant est défini par la « constante de temps ».

La constante de temps d'un bâtiment caractérise le temps de réponse de la température intérieure et son aptitude à résister aux perturbations externes.

La relation entre l'épaisseur sollicitée et le temps de diffusion de la chaleur à l'intérieur d'un composant de bâtiment homogène se formule en faisant le produit de la capacité calorifique par la résistance thermique de ce composant.

Sur une période t donnée, la chaleur pénétrera davantage dans un matériau ayant une diffusivité plus importante. (Loyal Chahwane ,2011)

¹¹ Karlsson Jonathan.(2012) «Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut powerconsumption peaks and increase the thermal comfort».

¹² A. Degiovanni.(1977) « Diffusivité et méthode flash, Revue Générale de Thermique, vol. 16, no. 185, pp. 420–442, (French) ».

Par exemple, une construction légère tel qu'une cloison en placoplâtre a une constante de temps moins d'une 1 heure, alors qu'une construction consistante de 1 m de béton a une constante de temps de presque 50 heures. (Solange Goulart, 2004)

Table I.1 : Valeurs de diffusivité α pour les matériaux de construction [J.A. Clarke,2001]

Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)	Densité ρ (Kg/m ³)	capacité thermique spécifique c J/(kg.K)	diffusivité thermique α (m ² /s)x10 ⁻⁵
Béton lourd	1.30	2000	840	77
Béton léger	0.2	620	840	38
Brique	0.62	1800	840	41
Plâtre	0.16	800	1090	19
Laine de roche	0.033	100	710	46
Polystyrène extrudé	0.035	25	1470	95

I.2.4.2- Effusivité thermique « b »

L'effusivité thermique d'un matériau, décrit la rapidité avec laquelle le matériau absorbe les calories. Symbolisée b, elle s'exprime en racine carrée de watheure par mètre carré Kelvin (Wh^{1/2}/m²k)¹³. L'effusivité thermique traduit la capacité d'un matériau à échanger sa chaleur avec son environnement. Plus précisément, cette propriété rend compte de la sensibilité de la température de surface d'un matériau à une variation du flux de chaleur reçu par cette surface. Ainsi, un matériau très conducteur et très capacitif aura une température de surface peu sensible à des variations de flux, ce matériau est donc très effusif. Cette propriété est donc liée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation ¹⁴ :

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \dots\dots\dots \text{Eq I- 4}$$

Où:

λ : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

ρ : masse volumique du matériau (Kg/m³)

¹³ S.Courgey.(2008) « Chargé de missions ‘ Approches environnementales’ AJENA,Nancy-Mars ».

¹⁴ Vincent Félix. (2011) «Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire».

c: capacité thermique spécifique du matériau (J/kg.K)

pc: capacité calorifique volumique (J/m³.K)

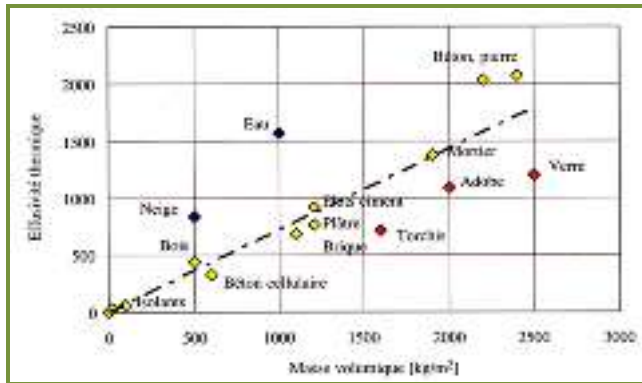


Figure I.18 : Effusivité thermique des divers matériaux en fonction de leur masse volumique.[C.A. Roulet ,2004]

Plus l'effusivité est grande, plus la chaleur interne à la pièce sera absorbée rapidement par le mur, et donc, plus l'élévation de température dans le local sera limitée. On privilégiera les matériaux ayant une grande effusivité. (J.L.Izard ,1993)

Ce paramètre est très intéressant pour les couches de parois en contact avec l'ambiance intérieure. En effet, sous l'effet des apports solaires et des apports internes, un matériau très effusif pourra transmettre la partie absorbée de ces apports au cœur de la paroi, sollicitant sa capacité à stocker l'énergie sans que sa température n'augmente notablement. Par exemple, si un revêtement de surface peu effusif (e.g. une moquette) est posé sur une couche plus effusive (e.g. un carrelage) après une rénovation, alors il devient plus difficile de stocker les apports solaires passifs. (Fabio Munaretto ,2014)

Table I.2 : Valeurs de l' effusivité b pour les matériaux de construction. [J.A. Clarke,2001]

Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)	Densité ρ (Kg/m ³)	capacité thermique spécifique c J/(kg.K)	Effusivité thermique b (Ws ^{1/2} /m ² K) x10 ⁻⁵
Béton lourd	1.30	2000	840	1478
Béton léger	0.2	620	840	323
Brique	0.62	1800	840	968
Plâtre	0.16	800	1090	385
Laine de roche	0.033	100	710	48
Polystyrène extrudé	0.035	25	1470	36

I.2.5- Les méthodes à quantifier la capacité du stockage thermique

I.2.5.1-La méthode de l'admittance

La méthode de l'admittance a été développée en Grande-Bretagne, elle est utilisée pour caractériser l'inertie thermique d'un bâtiment. L'admittance donne une mesure de l'habilité des composants du bâtiment à emmagasiner et restituer l'énergie durant le cycle journalier.

Cette méthode a été développée par Loudon en 1968 au "Building Research Establishment", ensuite en 1974, elle a été étudiée par « Petherbridge ». Le 1970 Guide (IHVE Guide – The Institution of Heating and Ventilating Engineers) est le premier qui a introduit le concept de l'admittance thermique, et depuis lors il a été adopté par CIBS Guide entre 1975 et 1980. Ces guides sont appelés à nos jours « CIBSE– Chartered Institution of Building Services Engineers » (G.solange, 2004).

(N.O Milbank et al., 1974) ont analysé la réponse thermique de bâtiments à entrée d'énergie cyclique en utilisant la procédure de l'admittance. Ils insistent que « la méthode de l'admittance est à l'origine une procédure manuelle qui cherche à équilibrer les besoins incompatibles pour simples calculs et réponses exactes ». Elle mesure le débit de chaleur entrant dans la surface interne d'un mur en réponse à une fluctuation de température cyclique unitaire de l'air se produisant du même côté.

Selon (C.Diaz,1994), la méthode d'admittance distingue deux caractéristiques importantes; d'une part, elle définit le processus de flux de chaleur vers et à partir des surfaces des matériaux au cours du cycle de variation de température de 24 heures. Et d'autre part, elle définit la variation de température résultante. L'admittance thermique d'un élément de construction exprime numériquement sa capacité à absorber ou libérer de la chaleur lorsque la température de la surface et de l'air sont différentes. L'unité de l'admittance (Y) est $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

L'admittance totale d'une pièce peut être calculée par la somme des produits de toutes les surfaces des parties de la pièce (A), et leur valeur d'admittance respective (Y) . Son unité est donnée en $W / \text{ } ^\circ C$.

Sa formule est représentée par l'expression suivante:

$$Y_t = \sum (A * Y) \dots\dots\dots \text{Eq I- 5}$$

Le concept d'admittance thermique est discuté par différents auteurs (M. G.Davis,1973), (J.Balcomb, 1983) comme rapport de la variation du flux thermique à la variation de température pendant un cycle de 24 heures et peut être exprimé comme:

$$Y = \sqrt{2 \pi \lambda \rho c / P} \dots\dots\dots \text{Eq I- 6}$$

Avec : P représente une période de cycle de 24 heures, λ la conductivité, ρ la masse volumique et c la chaleur massique.

Généralement, les matériaux qui ont une haute densité, ont aussi une haute conductivité thermique. Par conséquent ces matériaux sont bons pour le stockage de la chaleur. Ca veut dire que si le produit λ ρc est grand, la capacité de stockage de chaleur du mur sera haute (G.solange,2004).

I.2.5.2- La méthode de la capacité de la chaleur diurne

(J.Balcomb, 1983) définit le concept de la capacité de la chaleur diurne comme étant « la quantité de chaleur emmagasinée dans un bâtiment pendant la première moitié d'un cycle de 24 heure est restituée à l'espace pendant la seconde moitié du cycle. »

Basé sur les principes de la méthode de l'admittance, la capacité thermique diurne (dhc) permet le calcul de la variation de la température interne dérivé de la composante diurne du processus de stockage et de distribution de chaleur dans une pièce ou un bâtiment. Le paramètre dhc souligne l'importance de la composante diurne du stockage de la chaleur d'un bâtiment proportionnellement à la fois, le stockage de chaleur à court terme (stocké pendant quelques heures) et le stockage à long terme (stocké pendant de longues périodes, jours ou semaines) (C.Diaz,1994).

Le concept de la capacité de la chaleur diurne concerne deux aspects importants dans le processus de stockage de chaleur: le flux de chaleur à travers le mur et la variation de la température sur sa surface. La capacité de la chaleur diurne est la quantité de chaleur qui est stockée par degré de variation de la température. Cette relation peut être exprimée comme le rapport (C.Diaz,1994):

$$dhc = \sqrt{P \lambda \rho c / 2 \pi} \dots\dots\dots \text{Eq I- 7}$$

Elle est donnée en unité de Wh/ m²°C.

Les valeurs de la capacité de la chaleur diurne des matériaux varient en fonction de l'épaisseur et les propriétés thermiques du matériau. Si un mur est considéré infiniment épais, les valeurs de la capacité de la chaleur diurne peuvent être de 60.7 Wh/m²K pour un mur en béton, 36.7 Wh/m²K pour un mur en brique et 9.4 Wh/m²K pour une cloison en bois tendre. (G.solange,2004)

La capacité de la chaleur diurne d'une pièce entière ou d'un bâtiment peut être déterminée de la même façon qu'avec la procédure de l'admittance, en incorporant l'effet de toutes les surfaces qui agissent en parallèle. C'est la somme de toutes les valeurs de capacités de la chaleur diurnes pour toutes les surfaces que clôture une pièce.

Sa formule est représentée par l'expression suivante: (G.solange,2004)

$$DHC = \sum A dhc \dots\dots\dots \text{Eq I- 8}$$

Elle est donnée en unité de Wh/ °C.

D'après (J.Balcomb,1983) il sera nécessaire en premier de classer chaque surface de la pièce en l'associant avec le gain solaire qu'elle peut recevoir. Cette méthode considère la capacité de la chaleur diurne égale à zéro dans toutes les surfaces couvertes, tel que les murs ou les sols couverts de tissu épais, tapis, moquettes ou tableaux (images) et aussi les surfaces dissimulées derrière les armoires. De plus, la capacité de la chaleur diurne qui correspond au mobilier d'après Balcomb, peut être estimée de 11 Wh / K pour chaque m² de la surface du plancher pour les ameublements normaux.

Selon (C.Diaz,1994), la capacité de la chaleur diurne des éléments dépend de plusieurs paramètres, tel que l'épaisseur des matériaux et la surface.

Avec une efficacité variée entre différents matériaux, la capacité thermique diurne des éléments de construction peut être améliorée en augmentant leur épaisseur. Cela augmentera leur capacité calorifique et leur capacité à stocker la chaleur.

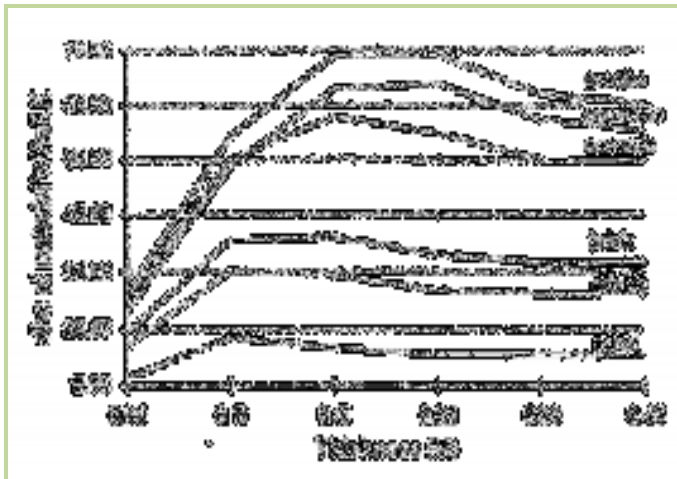


Figure I.19 : Effet de l'épaisseur sur la capacité calorifique diurne de divers matériaux. [C.Diaz,1994]

Le processus de stockage et de distribution de la chaleur dans et à partir des éléments de construction est optimisé par l'augmentation de l'exposition des surfaces. Alors que l'épaisseur aura une limite d'efficacité définie dans le cycle diurne, l'augmentation de la surface d'échange de chaleur sera bénéfique. La capacité thermique diurne des murs et des toits peut être augmentée avec une surface supplémentaire.

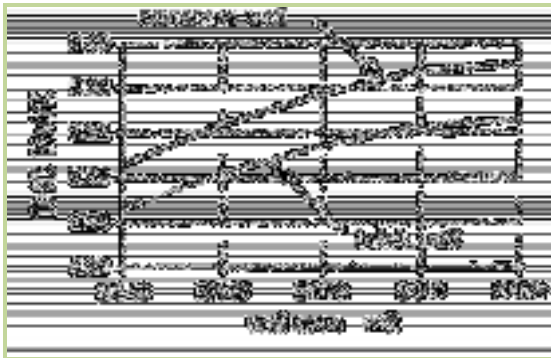


Figure I.20 : Capacité totale de chaleur diurne de la pièce en fonction de la superficie des surfaces internes. [C.Diaz,1994]

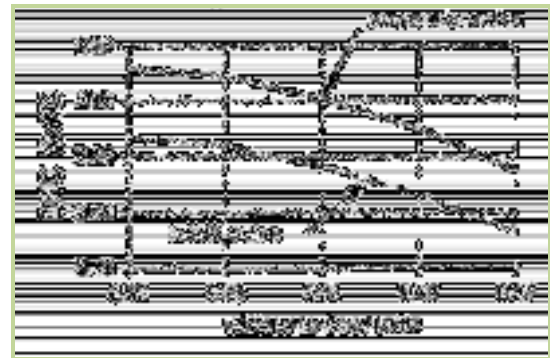


Figure I.21 : La réduction de la surface du mur par augmentation de la taille de la fenêtre. [C.Diaz,1994]

Les résultats de l'étude de (C.Diaz ,1994) de la variation de la température basés sur la méthode de la capacité de chaleur diurne ont révélé une bonne corrélation avec les deux résultats de simulations thermiques avec SERI-RES et ceux d'investigations. Les résultats montrent aussi que la procédure de la capacité de la chaleur diurne peut être utilisée pour prédire la variation de la température interne, à la fois pour les conditions d'hiver et d'été.

I.2.6- Type d'inertie thermique

A l'échelle d'un bâtiment, il y a deux types d'inertie de nature différente, l'inertie de transmission et l'inertie par absorption. Celle d'absorption augmente avec l'épaisseur et avec l'effusivité de la paroi. Celle de transmission augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi¹⁵.

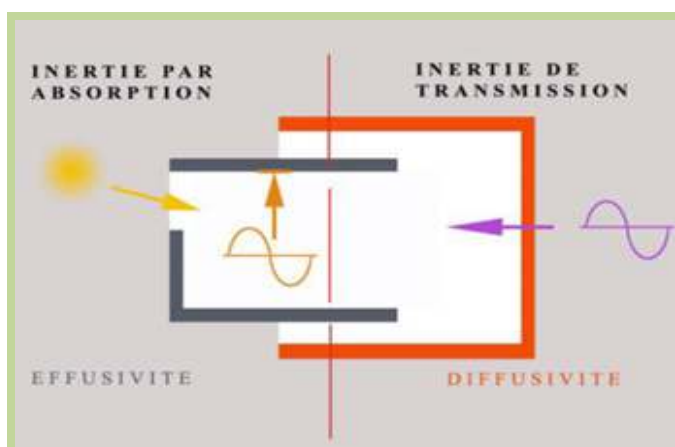


Figure I.22 : Les deux types d'inertie.
[www.atiane-energy.com]

I.2.6.1- Inertie de transmission

D'après (Daniel Bernstein et al., 1997) l'inertie de transmission décrit dans quelle mesure une paroi de l'enveloppe diminue l'amplitude d'une oscillation de la température extérieure et la retarde (déphasage) dans sa transmission vers l'intérieur. Cette inertie dépend principalement de la valeur de diffusivité du matériau de la paroi et de son épaisseur. Elle augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi.

(Pierre Lavigne ,2010) déclare que l'inertie de transmission est celle qui, résistant aux sollicitations dynamiques du climat (variations de température et d'ensoleillement), elle concerne donc son enveloppe.

Les parois qui séparent les ambiances intérieures et extérieures, chargées d'assurer la plus grande partie du confort intérieur, s'opposent, en parallèle à l'isolation, mais de manière différente, aux transmissions des variations du climat extérieur grâce à l'inertie de transmission. Cette inertie ne fonctionne bien que lorsque les variations de température quotidienne sont importantes. C'est spécifiquement le cas en été lorsque l'augmentation de la température de l'air se cumule avec les surchauffes créées par l'ensoleillement direct des parois. L'inertie de transmission n'empêche pas la chaleur de transiter à travers la paroi mais

¹⁵ Bernstein Daniel et al. (1997) « Anatomie de l'enveloppe des bâtiments: construction et enveloppes lourdes Paris: Edition LE MONITEUR, p 31-32 ».

ralentit sa vitesse de transmission et son amplitude. Le ralentissement est tel que la chaleur arrive à l'intérieur bien après que la paroi n'ait été soumise à l'ensoleillement maximal. Ce décalage temporel entre le moment où la température est maximale à l'extérieur et celui où elle l'est à l'intérieur est appelé le déphasage. Il doit être déterminé de manière à ce que la chaleur arrive à l'intérieur pendant la nuit lorsqu'il est possible de ventiler fortement pour l'évacuer sans incidence sur le confort intérieur. L'amplitude est réduite par le fait que le flux de chaleur poursuit sa trajectoire vers l'intérieur alors qu'une partie repart vers l'extérieur dès que l'ensoleillement disparaît.

L'inertie thermique de transmission peut contribuer à l'amélioration du confort d'été sans climatisation si elle est liée à une forte ventilation nocturne. Ce type d'inertie est efficace quels que soient l'usage du bâtiment et sa fréquence d'utilisation.¹⁶

I.2.6.2- Inertie par absorption

L'inertie d'absorption décrit comment la température de la face d'une paroi intérieure, en contact avec l'air du local, réagit à une oscillation du flux de chaleur intérieur. Plus la paroi est inerte, plus l'oscillation de la température de cette face est faible.¹⁷ Cette inertie réduit les variations internes de températures par absorption de chaleur.¹⁸

L'intérieur des parois extérieures, les parois intérieures verticales et horizontales et tous les objets intérieurs s'opposent aux variations rapides du confort intérieur et le stabilisent grâce à l'inertie d'absorption¹⁵. Elle augmente avec l'épaisseur et avec l'effusivité de la paroi.¹⁶

L'inertie par absorption s'oppose uniquement aux variations de température intérieure en se comportant telle une éponge thermique. La chaleur ou le froid peuvent provenir de l'extérieur ou de systèmes installés à l'intérieur. Lorsque l'évolution de la température intérieure est due à celle du climat extérieur, l'inertie par absorption n'a contrairement à l'inertie par transmission et aux isolants, aucune influence sur le flux de chaleur entre les deux ambiances. Son action n'est effective que lorsque la température intérieure commence à varier. Lorsqu'elle augmente, les murs absorbent de la chaleur jusqu'à

¹⁶ <http://passivact.com/>

¹⁷ Bernstein Daniel et al. (1997) « Anatomie de l'enveloppe des bâtiments: construction et enveloppes lourdes Paris: Edition LE MONITEUR, p 31-32 ».

¹⁸ Pierre Lavigne.(2010) « Comprendre les inerties thermiques dans les bâtiments ».

établir une nouvelle situation d'équilibre avec l'air. Inversement, lorsque la température intérieure baisse, les murs libèrent de la chaleur accumulée jusqu'à l'obtention ultérieure d'une nouvelle stabilité. L'inertie d'absorption amortit l'amplitude des variations de température intérieure d'où que provienne la source d'énergie et ce d'autant plus qu'elles sont importantes notamment en période estivale comme pour l'inertie de transmission. Elle provoque, également, un déphasage important qui peut notamment concourir à l'amélioration du confort intérieur si elle est couplée à une ventilation nocturne estivale importante et efficace¹⁵.

Une inertie par absorption, toujours nécessaire pour les volumes à occupation permanente mais à étudier par simulation informatique pour les édifices occupés par intermittence, permet l'hiver un bon captage solaire passif dans le confort et prolonge dans le temps les effets de la ventilation nocturne assurant le confort d'été¹⁷.

I.2.7- Détermination de la classe d'inertie

La classe d'inertie est déterminée conformément aux règles Th-Bât/Th-I éditées par le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment). On distingue 5 classes d'inertie :

- Très lourde : TL
- Lourde : L
- Moyenne : M
- Légère : l
- Très légère : tl

I.3- Les Paramètres influençant la performance de l'inertie thermique

La performance de l'inertie thermique dépend de différents facteurs. Pour obtenir une performance optimale, il est primordial de comprendre quels paramètres affectant l'efficacité de l'inertie thermique.

I.3.1- Conditions du climat

(S.Szokolay ,1985) suggère que l'utilisation de l'inertie thermique est plus appropriée dans les climats où la variation diurne de la température extérieure est supérieure à 10 K, comme la masse du bâtiment contribue à réduire le pic de la température extérieur et de maintenir les conditions internes dans la zone de confort en absorbant l'excès de chaleur.

En 1994, dans un livre intitulé «Passive and low-energy cooling of building», (B.Givoni, 1994) démontre que la température maximale pour laquelle la stratégie du stockage par l'inertie est encore possible dépend de la limite supérieure de confort thermique

dans les bâtiments non-climatisés. Cette limite dépend d'une part de la pression de vapeur ambiante et d'autre part de la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. D'après l'auteur, cette limite pourrait varier de 25°C pour un climat semi-humide (avec une pression de vapeur de 18 mmHg à 20 mmHg) à 28°C pour un climat aride (avec une pression de vapeur inférieure à 15 mmHg). De plus, cette limite peut encore être repoussée en augmentant la vitesse de l'air intérieur sans pour autant laisser entrer l'air extérieur. Par brassage de l'air intérieur à une vitesse de 2 m/s, cette limite est repoussée à 28°C pour un climat semi-humide et 30°C pour un climat aride.

Dans les régions humides, avec une pression de vapeur supérieure à 22 mmHg, la température extérieure minimale est insuffisante, et l'amplitude jour/nuit est trop faible, pour assurer le rafraîchissement nocturne de la masse par la ventilation. Pour que la condition sur la variation de température entre le jour et la nuit soit satisfaite, celle-ci doit être supérieure à 10°C.

En 1994, à Lyon, dans une conférence européenne sur «la performance énergétique et le climat intérieur dans les bâtiments», (J.Van der Maas et al., 1994) déclare que pour utiliser de l'air extérieur pour le refroidissement nocturne, la variation de température extérieure doit être assez importante avec une température et une humidité moyennes comprises dans la zone de confort», tout en évitant les infiltrations d'air chaud par la diminution de la ventilation durant la journée.

(E.Shaviv et al., 2001) calculent l'influence de la masse thermique et la ventilation nocturne sur la température intérieure maximale en été en différents endroits sous le climat chaud d'Israël. Ils démontrent que «La température intérieure maximale dépend linéairement de l'écart de température entre le jour et la nuit du site». De plus les résultats obtenus de cette étude montrent que «dans le climat chaud et humide d'Israël, Il est possible d'obtenir une réduction de 3-6 ° C Dans un bâtiment lourd sans utiliser un moyen de climatisation. La réduction exacte obtenue dépend de la quantité de la masse thermique, du taux de ventilation nocturne et de l'écart de température du site entre le jour et la nuit».

Une étude développée par Soteris .A Kalogirou et al en 2002, sur les effets de la l'application de la masse thermique des bâtiments à Chypre montre que « Le climat idéal pour profiter de la masse thermique est celui qui a une grande fluctuation de température. Chypre est un tel endroit, Avec des variations diurnes moyennes de température ambiante de 8 ° C en

hiver et 14 ° C en été mais avec des variations extrêmes de 18-20 ° C se produisant fréquemment pendant l'hiver et l'été». De plus, «l'utilisation de la masse thermique a contribué à l'abaissement des pics de température intérieure et au lissage des fluctuations de température, contribuant ainsi de façon significative au confort des occupants»

(Mohammad Arif Kamal, 2011) déclare que «la masse thermique est particulièrement bénéfique lorsqu'il y a une grande différence entre les températures extérieures de jour et de nuit surtout dans le climat chaud et sec. L'utilisation appropriée de la masse thermique modère les températures internes en faisant la moyenne des extrêmes jour / nuit (diurnes). Lorsqu'elle est utilisée judicieusement, la masse thermique peut retarder le flux de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment de 10 à 12 heures, produisant une maison plus chaude la nuit en hiver et une maison plus fraîche pendant la journée en été ».

I.3.2- Propriétés thermiques des matériaux de construction

Pour les échanges de chaleur entre les ambiances extérieure et intérieure de l'habitat, son enveloppe joue un rôle déterminant grâce à ses propriétés thermiques.¹⁹

(C.A. Balaras, 1996) déclare que la sélection des matériaux est également importante, puisque les propriétés thermophysiques influent sur la performance globale des systèmes de stockage de chaleur. De son côté (Solange Goulart, 2004) déclare que les propriétés thermophysiques des matériaux de construction peuvent influencer la performance de l'ensemble de la construction. Cela comprend les matériaux isolants qui peuvent être utilisés pour réduire les pertes de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, Mais aussi des matériaux à forte inertie thermique capables de stocker la chaleur et de retarder la conduction de la chaleur par les éléments structuraux.²⁰

La haute densité des matériaux de construction est aussi un indicateur de haute conductivité thermique, c'est à dire qu'ils ont une faible résistance thermique. Par contre, les matériaux isolants ont une basse conductivité et une haute résistance thermique, donc ils font de bons isolants thermiques mais faibles pour le stockage de la chaleur (Solange Goulart, 2004).

¹⁹ A. Kemajou et L. Mba.(2011) «Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude Application au cas des régions climatiques camerounaises».

²⁰ L. Wadsöa,c , J. Karlssona and K. Tammob.(2012)«Thermal properties of concrete with various aggregates».

La conductivité thermique et la capacité calorifique volumétrique sont deux propriétés thermophysiques qui peuvent fortement influencer la performance énergétique de l'enveloppe.²¹

Pour montrer des valeurs suffisantes d'inertie thermique, les matériaux de construction doivent posséder une diffusivité thermique appropriée, qui détermine la profondeur que l'onde thermique diurne atteint dans la composante architecturale: les matériaux à forte diffusivité thermique sont beaucoup plus efficaces pour l'accumulation de chaleur cyclique à des profondeurs importantes que ceux à faible valeur.²²

I.3.3- Ventilation

La ventilation naturelle est une stratégie efficace pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et améliorer la satisfaction des occupants et la qualité de l'air intérieur (F.Allard, 1998). Cette stratégie est due soit au vent (différence de pression sur les façades extérieures), soit aux différences de température, ou les deux simultanément.(Julien Bouyer,2009)

(C.A. Balaras, 1996) déclare que « l'air de ventilation augmente les pertes de la chaleur convective des éléments de la masse et dissipent la chaleur restituée vers l'extérieur où la température est inférieure »

Le rôle de la ventilation sur la performance de l'inertie thermique est principalement associé aux heures de nuit. En périodes chaudes, les températures externes sont habituellement inférieures le soir que les températures internes, donc c'est possible d'utiliser l'air la nuit pour refroidir la structure du bâtiment (Solange Goulart, 2004).

La ventilation nocturne est l'une des techniques de refroidissement passives peu coûteuses qui peuvent contribuer à réduire la charge de refroidissement des bâtiments et à améliorer le confort thermique des occupants. Cette technique utilise l'air frais extérieur obtenu par la ventilation nocturne, pour diminuer la température de l'air intérieur ainsi que la température de la structure du bâtiment. Les effets de ces derniers peuvent être observés

²¹ Linshuang Long, Hong Ye. (2015) «Effects of thermophysical properties of wall materials on energy performance in an active building ».

²² Li and Xu.(2006) «Thermal Mass Design in Buildings - Heavy or Light? International Journal of Ventilation ».

surtout dans les bâtiments ayant une masse thermique élevée, avec une température de l'air intérieur plus basse et retardée le lendemain.²³

Comme expliqué par Layal Chahwane en 2011 : « Le rôle de l'inertie thermique est souvent associé aux périodes nocturnes par sa propriété à stocker les apports excédentaires durant la journée et de les restituer plus tard lorsqu'il fait plus froid la nuit en ayant recours à la ventilation. Durant les nuits d'été, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise par la convection la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur ». D'après (Givoni, 1991), pour augmenter l'effet de refroidissement la nuit, le bâtiment devrait être fermé pendant la journée pour éviter d'amener l'air extérieur chaud dans les pièces.

Plusieurs études montrent que la combinaison entre la masse thermique et la ventilation nocturne peut diminuer la température intérieure maximale dans les bâtiments en été.

Dans les bâtiments naturellement ventilés, la masse thermique est efficace pour réduire la fluctuation de la température de l'air²⁴. Comme expliqué par (B. Givoni 1991) : « La masse thermique intérieure stocke l'énergie pendant les heures de la journée, qui doit être libérée pendant la nuit, lorsque le bâtiment est ventilé ».

En période de journées chaudes et de nuits fraîches, la chaleur absorbée par la masse du bâtiment doit être dissipée le soir. Dans les climats chauds extrêmes, cela se produit généralement par conduction entraînée par la différence de température entre la structure et l'air extérieur. En raison des nuits claires de ces régions, le processus de la chaleur est également accéléré par le rayonnement. L'utilisation de l'isolation peut réduire le taux de perte de chaleur nécessaire à travers la structure pendant les premières heures de la soirée mais l'introduction de la ventilation nocturne favorisera rapidement ce processus. (C. Diaz, 1994)

En été 1993, à Pala, en Californie du Sud, dans une étude expérimentale, (B. Givoni, 1998) a testé l'efficacité de la masse thermique et de la ventilation nocturne pour abaisser les températures intérieures (maximales) diurnes dans trois bâtiments ayant différents niveaux de

²³ Tetsu Kubota et al. (2009) « The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia ».

²⁴ H. Asan, Y.S. Sancaktar. (1998) « Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28 (2) 159–166 ».

masse (faible, moyenne et élevée). Les résultats ont montré que, pour les bâtiments à faible masse, la ventilation nocturne n'avait qu'un très faible effet sur la réduction des températures maximales intérieures. Cependant, elle était très efficace pour abaisser les températures maximales intérieures pour les bâtiments à masse élevée.

Une autre étude réalisée par (Solange Goulart, 2004) montre que lorsque la ventilation nocturne était appliquée, des réductions importantes de la température maximale interne ont été obtenues par rapport au bâtiment sans ventilation nocturne (des réductions de 5 ° C peuvent être atteintes). Aussi il y avait une grande corrélation entre la réduction de la température maximale interne et la variation de température extérieure lorsque des parois de forte inertie thermique sont utilisées. C'est aussi l'analyse des résultats expérimentaux de (Blondeau et al., 1997) a montré que la ventilation nocturne a réussi à diminuer les températures diurnes de l'air intérieur de 1,5°C à 2°C, même lorsque la moyenne de la plage de température quotidienne de l'air était seulement 8,4 °C pendant la période expérimentale.

L'influence de la masse thermique et la ventilation nocturne sur la température intérieure maximale en été en différents endroits sous le climat chaud d'Israël a été étudiée par (E.Shaviv et al., 2001). Une analyse pour la détermination de la réduction de la température intérieure maximale par rapport à la température extérieure maximale (T_{max}) a été effectuée en utilisant un modèle de simulation horaire ENERGY pour prédire la performance thermique du bâtiment. Les résultats de l'étude montrent qu'il est possible d'obtenir une réduction de 3-6 ° C dans un bâtiment lourd sans utiliser un moyen de climatisation. La réduction exacte obtenue dépend de la quantité de la masse thermique, du taux de ventilation nocturne et de l'écart de température du site entre le jour et la nuit.

Une étude réalisée par (S. Amos-Abanyie et al., 2013) dans le climat chaud-humide du Ghana montre que les effets combinés de la masse thermique, la taille de la fenêtre et de la ventilation nocturne peuvent réduire la température maximale de l'air intérieur et d'améliorer le confort thermique.

(Santamouris, D.N. Asimakopoulos Eds, 1996) ont montré que les techniques de ventilation nocturne, lorsqu'elles sont appliquées à des bâtiments massifs, peuvent réduire considérablement la charge de refroidissement des bâtiments climatisés et augmenter le niveau de confort thermique des bâtiments non climatisés.

I.3.4- L'inertie thermique et l'isolation

En général, la masse thermique et l'isolation jouent un rôle important dans la performance thermique globale d'un bâtiment. (V. Hopkins et al., 1979)

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle crucial dans la réduction de la demande d'énergie opérationnelle. Les deux principales propriétés de l'enveloppe du bâtiment à considérer dans cette perspective sont la transmittance thermique U ($W / m^2 K^1$) et l'inertie thermique.

Ces deux propriétés sont aussi traditionnellement reliées à deux demandes énergétiques différentes : Tandis que la transmittance thermique est cruciale pour réduire la demande d'énergie de chauffage, l'inertie thermique a un impact sur la demande d'énergie pour le refroidissement.²⁵

Il est bien connu qu'il est nécessaire d'isoler les bâtiments pour diminuer la demande thermique et diminuer l'utilisation de chauffage et de refroidissement.²⁶

Les matériaux isolants ont une valeur élevée de résistivité thermique, ce qui signifie qu'un composant du bâtiment avec une couche d'isolation a une faible transmittance thermique. Les faibles valeurs de transmittance thermique U signifient que le composant a une résistance thermique totale élevée R , cette caractéristique peut représenter le degré d'isolation dans un tel composant de bâtiment (Solange Goulart, 2004).

Dans une étude expérimentale (E. Stéphan et al,2014) ont évalué l'effet de l'inertie thermique estivale dans les anciens bâtiments en pierre de Tuffeau et déterminer l'impact de l'isolation interne sur cette conception passive. Les résultats ont montré qu'en été, l'inertie thermique peut varier dans un même bâtiment selon la localisation de la pièce et selon le matériau (épaisseur, isolation,..).De plus, l'isolation permet une diminution des variations de température intérieure et retarde le maximum de température intérieure.

(Di Perna et al, 2011) ont analysé l'effet d'une isolation interne sur le comportement thermique des salles de classe. Les résultats ont montré que l'inertie thermique de ces salles est dégradée avec l'isolation.

²⁵ Francesco Goia et al.(2015) « Impact of opaque building envelope configuration on the heating and cooling energy need of a single family house in cold climates».

²⁶ L.F. Cabeza et al.(2009) «Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction».

(J. Zhou et al.,2008) ont discuté l'effet de la masse thermique externe et interne sur la température de l'air intérieur pour six murs extérieurs de différentes configurations et matériaux, y compris des structures légères et lourdes avec et sans isolation externe / interne. Ils ont trouvé qu'en été, afin de réduire la température maximale de l'air intérieur pour les pièces naturellement ventilées à Changsha , Chine. L'utilisation d'un mur lourd avec isolation externe devrait avoir la plus faible amplitude de température de l'air intérieur parmi les six murs extérieurs différents. Ainsi, le mur lourd avec isolation externe serait le meilleur choix.

(Sami A. Al-Sanea et al., 2011) ont montré aussi qu'un mur avec isolation extérieure donne une meilleure performance thermique globale par rapport à un mur avec isolation intérieure

(Pablo La Roche et Murray Milne,2003) déclarent que le refroidissement nocturne se produit lorsqu'un bâtiment à masse élevée isolée est ventilé avec de l'air extérieur frais de sorte que sa masse structurelle est refroidie par convection de l'intérieur, en contournant la résistance thermique de l'enveloppe. Pendant la journée, S'il y a une quantité suffisante de masse refroidie et qu'il est suffisamment isolé de l'extérieur, il agira comme un dissipateur de chaleur, Absorbant la chaleur pénétrée et générée à l'intérieur du bâtiment, en réduisant l'augmentation de la température intérieure.

I.3.5- Occupation et gains de chaleur internes

L'efficacité de l'inertie thermique dans les climats chauds dépend de la bonne gestion par les occupants et de la quantité de gains internes par les appareils.

Les gains internes proviennent de toutes sources qui génèrent de la chaleur à l'intérieur du bâtiment (Solange Goulart, 2004).Les principales sources de charges internes sont les occupants, les appareils d'éclairage et les équipements électriques²⁷.

Le gain de la chaleur interne ou la chaleur produite dans un espace dépend du type du bâtiment et de son usage (Solange Goulart, 2004).La modification de l'occupation des espaces internes et des surfaces, Peut réduire considérablement l'efficacité du stockage thermique (C.A. Balaras ,1996).

L'utilisation de l'inertie thermique n'est pas suffisante si les utilisateurs n'appliquent pas la bonne stratégie de ventilation. Il est important de maîtriser la ventilation et la masse thermique exposée car l'occupant peut priver l'inertie disponible en utilisant des faux-plafonds et des revêtements de murs et de sol. (J.Van Der Maas, F.Florentzos et al., 1994)

²⁷ Turgay Coşkun et al.(2015) « The importance of internal heat gains for building cooling design».

(S.Szokolay, 1996) déclare que la technique de ventilation nocturne / fermeture diurne est efficace, mais contraire à la préférence des gens pour la vie en plein air.

Une étude réalisée par (C.Diaz,1994) montre que la performance de la masse thermique peut être neutralisée par l'effet des gains de chaleur à travers la structure des éléments non isolés ou par l'excès des gains internes. Cette étude montre aussi l'influence des gains internes lors de la ventilation nocturne. Quand les espaces ont été occupés, il a été observé que l'efficacité de la ventilation nocturne pourrait être réduite par l'effet de gains internes.

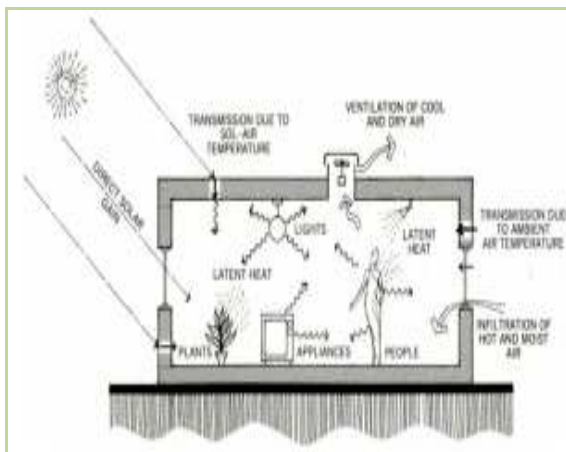


Figure I.23 : gains de chaleur internes.

I.3.6- Les fenêtres

Les fenêtres sont l'un des éléments qui ont une grande influence sur la performance des bâtiments, tant en termes de confort thermique et de consommation d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement (Ana Rita Amaral et al.,2016). Elles sont les éléments de construction les plus sensibles aux variations climatiques jouant un rôle significatif dans la définition du confort thermique interne.(O.Corbela et V. N. Corner ,2002)

(C.Koranteng, 2015) déclare que les fenêtres sont peut-être les éléments les plus complexes et les plus intéressants de toute structure habitable. La perte et le gain de chaleur à travers une fenêtre ne dépendent pas seulement du type de fenêtre et de ses propriétés seules mais aussi de la taille et de la position de la fenêtre. De son côté (F.M.Elaiab,2014) affirme que les matériau de fenêtres, l'orientation et son rapport de surface au mur sont les principaux facteurs affectent la performance du système vitré.

La quantité d'énergie requise pour opérer le bâtiment découle en grande partie du système de fenestration et de la stratégie de ventilation, comme indiqué par (Bordas et coll., 2001; Sartori et Hestens, 2007)

(Julien Bouyer,2009) déclare que « La stratégie de positionnement des ouvertures pour la ventilation naturelle dans les bâtiments est un aspect fondamental qui détermine l'efficacité du procédé ».De son coté (Tiberiu Catalina,2009) affirme que « Les baies vitrées et leur distribution sur l'enveloppe sont aussi des paramètres essentiels lors de la conception d'un bâtiment ».ainsi que « Les dimensions des fenêtres les plus appropriées dépendent de l'orientation du bâtiment et de sa masse thermique »

C'est aussi l'étude (Al-Tamimi et al.,2010) montre qu'une sélection appropriée pour l'orientation des fenêtres, la taille optimale du verre et l'application d'un système de ventilation naturelle peuvent améliorer le confort thermique en diminuant l'effet négatif du rayonnement solaire.

L'étude de (B.Givoni, 1994) montre que la taille de la fenêtre et sa position affectent également le mouvement de l'air à l'intérieur des espaces, affectant ainsi le confort intérieur. Le potentiel de la pénétration solaire à travers les fenêtres dans le climat chaud, et son effet sur l'augmentation de la température intérieure, dépend fortement de l'orientation des fenêtres.

(E.Shaviv et I.G.Capeluto, 1992) enquêtent l'importance relative de quelques paramètres constructifs dans le climat chaud humide, et ils illustrent le besoin pour la conception prudente de l'occultation de la fenêtre les jours d'été. D'après leurs résultats la fenêtre occultée est « le premier paramètre de conception géométrique que l'architecte devrait consacrer plus d'attention pendant le processus de la décision »

I.3.7- Emplacement et distribution de l'inertie thermique

Plusieurs études ont montré l'importance de l'emplacement de la masse thermique. (C.A. Balaras, 1996) déclare que « l'emplacement de la masse thermique est un facteur important. Les matériaux thermiquement lourds exposés directement au rayonnement solaire incident absorbent plus efficacement l'énergie thermique que les matériaux absorbant la chaleur indirectement par le rayonnement à longues ondes et la convection d'air ambiant ».

D'après (J.Balcomb, 1983) les murs internes sont beaucoup plus efficaces pour le stockage de chaleur que les murs externes parce que chacune des deux surfaces, en augmentant son efficacité, peut travailler à emmagasiner la chaleur. Sur le cycle journalier, l'épaisseur active suggérée par Balcomb est typiquement de 10 cm pour les matériaux de faible densité et de 18 cm pour les matériaux de haute densité.

(C.Diaz, 1994) a évalué l'effet de la masse thermique sur la température interne d'un espace à une seule zone où l'emplacement, la quantité et la distribution de la masse thermique ont été explorées. Les résultats de cette étude montrent que le sol est l'endroit où la masse thermique a le moindre impact sur la température interne. L'évaluation paramétrique conclut que les parois internes sont l'endroit le moins efficace, mais comme la structure du bâtiment devient plus lourde, l'emplacement de la masse thermique perd son importance.

La masse thermique doit être répartie correctement autour du bâtiment en fonction de l'orientation d'une surface donnée et du déphasage souhaitable²⁸. Une surface avec une orientation nord a peu besoin de déphasage, puisqu'elle ne présente que de faibles gains de chaleur. Pour d'autres orientations; telles que les orientations est, ouest et sud, il est souhaitable d'avoir un très long déphasage. Le toit, qui est exposé au rayonnement solaire pendant la plupart des heures de la journée, nécessiterait un déphasage très long. (F.M.Elaiab,2014)

(C.A. Balaras, 1996) rajoute qu' une surface avec une orientation nord ou est a peu besoin d'un déphasage. Pour les orientations sud et ouest un déphasage de 8 h est suffisant pour retarder le transfert de chaleur de midi jusqu'à la soirée.

Les résultats de l'étude de (Soteris .A.Kalogirou et al., 2002) montrent qu'un mur de masse thermique orientée vers le sud offre certains avantages et devrait être utilisée chaque fois que les bâtiments sont construits avec des murs orientés vers le sud, à condition que les variations de température du site soient importantes.

(Sami A. Al-Sanea et al.,2011) ont étudié l' effets de la variation de la quantité et de la localisation de la masse thermique sur les caractéristiques dynamiques de transfert de chaleur des murs isolés du bâtiment dans des conditions périodiques stables en utilisant les données climatiques de Riyadh. Les résultats montrent que pour une masse thermique donnée, un mur avec une isolation externe offre une meilleure performance thermique globale par rapport à un mur avec une isolation intérieure.

Le toit est l'un des éléments du bâtiment les plus sensibles dans les climats chauds, parce qu'il est exposé à la radiation solaire la plus grande partie du jour. Il représente 60% des transferts totaux de chaleur du bâtiment. (Fewzi Fardeheb,1987) affirme que la forte inertie du toit joue énormément sur l'amortissement du bâtiment, mais aussi sur le déphasage.

²⁸ Norbert lechner.(2015) « heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects».

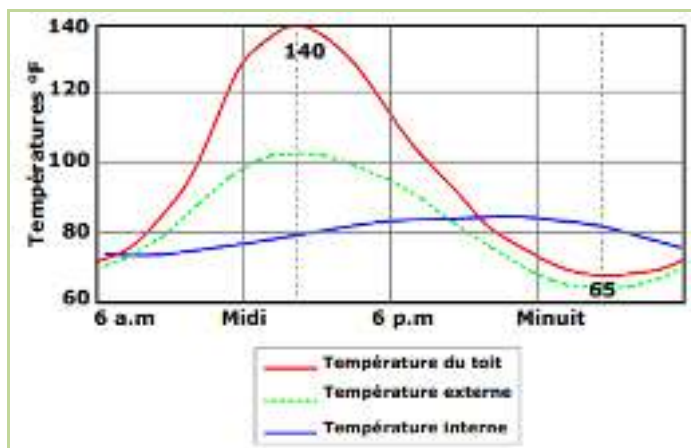


Figure I.24 : La forte inertie du toit permet un déphasage et un amortissement important.

[F. Fardheb, 1987]

Le toit, qui est exposé au rayonnement solaire pendant la plupart des heures de la journée, nécessiterait une construction très lourde avec un long déphasage. La construction des toits très lourds est exigée, mais quelque fois, l'utilisation d'une isolation supplémentaire dans le toit est généralement recommandée parce qu'il est très coûteux de construire des toits massifs, tel que rapporté par (C.A.Balaras, 1996).

I.4- Le rôle de l'inertie sur le confort thermique

I.4.1- L'efficacité de l'inertie thermique en été

L'un des principaux objectifs de la conception d'un bâtiment est de fournir une condition de confort pour les occupants du bâtiment, tout en minimisant la consommation d'énergie du bâtiment. (F.M.Elaiab, 2014)

Le confort estival est une priorité. Il dépend de nombreux paramètres dont le choix des matériaux de mur est l'un d'entre eux. Depuis des siècles, les habitants des climats chauds ont trouvé des solutions pour réduire la température intérieure. L'un d'eux est de construire des murs forts: en effet, ils avaient découvert la puissance de la masse thermique. (Alexandre Faudier, 2010). La masse thermique joue un rôle important si elle est bien considérée dès le début de la conception. (Anais Lagesse et al.,2013)

De nombreuses études ont été faites sur l'influence de l'inertie thermique sur le confort thermique d'été.

Une étude expérimentale réalisée par (C.Diaz, 1994) dans les climats chauds de Managua (Amérique centrale) et le sud de l'Espagne visant l'optimisation de la masse thermique pour le refroidissement intérieur des bâtiments non domestiques.

La stratégie adoptée pour le travail de terrain a été divisée en deux étapes. La première étape a fourni un aperçu de l'effet de l'inertie thermique et de la ventilation nocturne dans les bâtiments en conditions chaudes. Cela comprenait l'enregistrement des mesures de température à différents moments de la journée sur deux bâtiments administratifs typiques l'un est traditionnel (lourd) et l'autre est contemporain (léger) de la ville de Managua, au Nicaragua en Amérique centrale. La deuxième phase du travail sur le terrain a été réalisée avec le suivi thermique de quatre bâtiments (deux bâtiments récents et deux bâtiments traditionnels de différents types de construction) situés dans la région du sud de l'Andalousie en Espagne pour une période d'une semaine par bâtiment et avec un programme de surveillance prolongé. L'analyse des données a été suivie par des études paramétriques dans un espace de zone unique.

Les résultats concernant la première expérience confirment l'importance de la masse thermique comme modérateur de l'environnement. La présence d'éléments massifs dans la structure peut représenter des avantages significatifs pour réduire l'inconfort thermique causé par la surchauffe dans les bâtiments occupés pendant la journée dans les climats chauds. L'augmentation de la capacité thermique dans l'enveloppe du bâtiment stabilise les températures internes en gardant les conditions plus froides que l'extérieur pendant les heures de jour, bien que la nuit l'intérieur reste chaud.

En ce qui concerne l'effet de la ventilation nocturne, l'augmentation des taux de changement d'air pendant la nuit selon les simulations a été bénéfique sur le modèle de la structure lourde. Sa structure plus lourde a pu maintenir au cours de la journée l'influence du refroidissement nocturne. Une différence de température de 5K à 6K par rapport à l'extérieur a été suggérée par les simulations. Les conditions du modèle de la structure légère n'ont pas été améliorées par l'introduction de la ventilation nocturne.

Les résultats concernant la deuxième expérience suggèrent que si les gains solaires sont minimisés, la répartition et l'exposition de la masse à l'intérieur du bâtiment peuvent avoir un rôle plus important dans l'amélioration des conditions internes que la quantité de masse thermique seule.

L'effet de la masse thermique des bâtiments doit être mesuré par rapport aux gains de chaleur. L'effet de l'inertie thermique de la masse des bâtiments peut être réduit par une dissipation inadéquate des gains de chaleur. Les résultats d'un des bâtiments indiquent qu'une enveloppe massive ne peut pas être suffisante pour réduire les températures internes si elle n'est pas protégée et si le rapport masse / plancher de la pièce n'est pas suffisant, surtout avec

l'effet supplémentaire de gains internes. Les températures maximales ont également été enregistrées dans le bâtiment, qui a des murs d'enveloppe non isolés et relativement légers. Parmi les bâtiments surveillés, le bâtiment avec une plus petite partie de son mur exposé à l'extérieur, une structure plus massive et une plus grande valeur du rapport masse / plancher, ont présenté une meilleure performance avec une température plus basse et l'effet de la ventilation nocturne était le plus évident.

Une autre étude réalisée par (Maldonado et al., 1997) dans le cadre du projet PASCOOL évalue la performance thermique de certains bâtiments en Europe du Sud et de caractériser la contribution du refroidissement passif dans les bâtiments. 23 bâtiments de neuf pays européens (Portugal, Espagne, France, Suisse, Italie, Hongrie, Bulgarie, Slovénie et Grèce) ont été examinés et surveillés pendant une courte période pendant l'été et les données collectées ont servi de base à l'analyse de sensibilité avec des simulations thermiques. La sélection englobait des bâtiments de construction typique, y compris des immeubles résidentiels (5 appartements et 3 maisons) et non résidentiels (8 complexes éducatifs et 6 immeubles de bureaux), récents et traditionnels. Les études englobent les effets de nombreux aspects tels que le contrôle solaire (l'utilisation des dispositifs d'ombrage), Ventilation nocturne, isolation thermique, gains internes et l'inertie thermique.

Les résultats concernant la performance de l'inertie thermique sont résumés ci-dessous :

- Les bonnes performances dépendent de l'inertie thermique suffisante, du contrôle solaire et de la ventilation nocturne. Cependant, l'absence même d'une de ces trois caractéristiques est une raison suffisante pour une dégradation de la performance.
- Quelque soit le type de construction, les meilleures performances thermiques ont été obtenues à partir de bâtiments lourds, bien ombragés, traditionnels de maçonnerie dans les climats d'été modérés. Un taux de ventilation élevé pendant la nuit et un faible taux pendant les heures chaudes de la journée ont conduit à la meilleure performance.
- Les bâtiments lourds dans les climats les plus chauds de l'Europe du sud présentaient également des températures intérieures stables, mais à des valeurs moyennes supérieures à la zone du confort thermique, c'est-à-dire supérieure à 30 ° C. Ces bâtiments dépendaient de la ventilation, des ventilateurs de plafond ou de la climatisation mécanique pour obtenir des conditions acceptables pour les occupants.

- Une inertie thermique insuffisante est susceptible de provoquer une surchauffe ou une consommation excessive d'énergie. Une faible inertie thermique peut être due à une construction légère ou à une finition intérieure légère. Lorsque l'ombrage des surfaces vitrées n'est pas soigneusement considéré, la situation s'aggrave considérablement. Dans ce cas, la ventilation nocturne devient peu utile, car il n'y a aucun moyen de stockage de froid dans la structure du bâtiment.

C'est aussi l'étude menée par le (CSTB, 2004) à la demande de CIMBETON évalue l'impact de l'inertie thermique des bâtiments résidentiels sur le confort d'été à l'aide du logiciel de calcul de thermique d'été « COMET ». Elle prend en compte :

- Quatre types d'habitations (deux logements collectifs et deux maisons individuelles) dont on fait varier l'orientation, la protection solaire et l'exposition au bruit ;
- Cinq types de structures de construction conduisant à tester ces bâtiments pour cinq inerties thermiques : très faible, faible, moyenne, forte et très forte ;
- Deux zones climatiques, nord et sud de la France

Il en ressort en conclusion de cette étude que:

- Plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible et plus les variations de température jour/nuit sont faibles. Ces deux résultats sont particulièrement favorables au confort thermique en été. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes.
- L'utilisation de matériaux lourds, famille à laquelle le béton appartient, contribue à donner au bâtiment une forte inertie. Elle évite les surchauffes et aide à la stabilité de la température.
- Associée aux autres facteurs influant sur la température, et notamment la ventilation nocturne de l'habitation, une bonne inertie permet d'obtenir un bon confort thermique d'été dans la plupart des situations, en stockant la fraîcheur nocturne qui est restituée dans la journée

(C. Di Perna et al., 2010) ont évalué l'influence de l'inertie interne de l'enveloppe du bâtiment sur le confort thermique d'été dans les immeubles à forte charge thermique interne. Cette étude comportait une analyse expérimentale de deux salles de classe similaires d'un bâtiment scolaire à Loreto, Italie caractérisées par une inertie thermique différente du côté intérieur (en plaçant un panneau de plâtre interne avec un panneau isolant de 5 cm d'épaisseur

à l'intérieur d'une des deux salles de classe. Cette intervention a entraîné une diminution considérable de la masse thermique interne), ainsi qu'une série d'analyses paramétriques utilisant le logiciel Energyplus. Les résultats montrent que pour le confort d'été, la paroi à forte inertie interne est la meilleure solution, en considérant que les fenêtres sont toujours fermées ou toujours ouvertes ou adoptent un "horaire" d'ouverture et de fermeture adaptative.

Une autre étude menée par (T.Kumirai, DCU Conradie, 2013) vise à analyser la performance thermique de deux bâtiments. L'un a une masse thermique importante et l'autre a une masse thermique faiblement isolée. Les résultats ont confirmé que le bâtiment à masse thermique élevée a de meilleures performances thermiques en termes de charges de refroidissement, de température intérieure et de confort thermique pendant l'été par rapport au bâtiment léger fortement isolée.

(C.A.Balaras,1996) a conclu que la structure de masse joue un rôle essentiel dans la réponse thermique du bâtiment, en général, un bâtiment de masse élevée a une variation de température de l'air intérieur plus petite qu'un bâtiment de faible masse et il peut conduire à une réduction significative de la demande d'énergie pour le refroidissement, en particulier dans les endroits avec grandes écarts de température diurnes . De petites variations de température à l'intérieur ont également une influence positive sur le confort thermique des occupants.

(D.Ogoli ,2003) a testé l'effet de la masse thermique dans l'abaissement des températures intérieures maximales diurnes. Quatre chambres d'essais avec différents niveaux de masse thermique ont été surveillées sous différents types de plafond à Nairobi, au Kenya, pendant la période chaude entre janvier et mars 1997. Les murs pour deux chambres d'essai étaient en pierre naturelle tandis que pour les deux autres étaient des boiseries. De plus, la toiture de deux chambres d'essai était une tuile de béton lourde tandis que pour les deux autres, il s'agissait de plaques de tôle ondulée galvanisée légère (GCI).

Les résultats ont montré que les chambres d'essai à faible masse suivaient de près les conditions extérieures et n'offraient pas de stockage thermique important. Toutes les chambres d'essai de masse légère sans plafond ont enregistré un faible effet sur les températures maximales intérieures. Cependant, une masse thermique élevée était très efficace pour abaisser les températures maximales intérieures en dessous de températures maximales élevées extérieures. Lors d'une journée chaude en février, lorsque la température extérieure

maximale était supérieure à 33 ° C, la température maximale intérieure dans l'immeuble à grande masse était de 25,4 ° C (une réduction de 7.6 °C).

I.4.2- L'inertie thermique et l'effet de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle intégrée à la masse thermique est un système de refroidissement passif qui peut être utilisé pour ajuster l'environnement intérieur pour assurer le confort thermique intérieur et maintenir une qualité acceptable de l'air intérieur.²⁹

(J. Zhou et al.,2008) ont discuté l'effet de la masse thermique externe et interne sur la ventilation naturelle et la température de l'air intérieur pour six murs extérieurs de différentes configurations et matériaux, y compris des structures légères et lourdes avec et sans isolation externe / interne. Ils ont trouvé qu'en été, afin de réduire la température maximale de l'air intérieur pour les pièces naturellement ventilées à Changsha, Chine. L'utilisation d'un mur lourd avec isolation externe devrait avoir la plus faible amplitude de température de l'air intérieur parmi les six murs extérieurs différents. Ainsi, le mur lourd avec isolation externe serait le meilleur choix.

Une étude récente menée par (Filippo Calcerano et Carlotta Cecchini ,2015) vise à analyser dans les rénovations de bâtiments existants la relation complexe entre les systèmes de ventilation naturelle (ventilation unilatérale , ventilation transversale, cheminée thermique, tour de refroidissement par évaporation et conduites de terre et l'inertie thermique de l'enveloppe extérieure massive en béton caractérisé par deux épaisseurs : lourde (A, 30 cm) moyenne-légère (B, 18 cm) dans le climat méditerranéen représenté par trois endroits, Rome, Naples et Messine. Les résultats montrent que dans les mêmes conditions de confort, la paroi de 30 cm d'épaisseur conserve son rôle de volant thermique tandis que l'épaisseur de 18 cm montre une réactivité excessive aux contraintes climatiques, ce qui entraîne une consommation énergétique moyenne de 2,8%.

(R.Kammerud et al.,1984)démontrent que la masse thermique avec ventilation nocturne peuvent réduire la température intérieure maximale dans les bâtiments dans des conditions climatiques chaudes. Par conséquent, les températures de confort peuvent être obtenues par une application appropriée de systèmes de refroidissement passifs (E. Shaviv ,1989).

²⁹ J. Zhou et al .(2008) «Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings».

Une étude expérimentale a été développée par (B.Givoni ,1998) pour évaluer l'effet de la masse et de la ventilation nocturne dans l'abaissement des températures intérieures (maximales) diurnes et l'amélioration des conditions de confort. Trois bâtiments ayant différents niveaux de masse (faible, moyenne et élevée) ont été suivis au cours de l'été 1993 à Pala, en Californie du Sud, dans des conditions de ventilation et d'occultation différentes. Les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes:

- Fenêtres non occultées, fermées jour et nuit;
- Fenêtres occultées, fermées jour et nuit;
- Fenêtres occultées, fermées durant la journée et ventilées pendant la nuit (7h à 19h) par un ventilateur, à trois vitesses des ventilateurs.
- Fenêtres ouvertes jour et nuit, ventilation assistée par ventilateur la nuit.

Les résultats ont montré que, pour les bâtiments à faible masse, la ventilation nocturne n'avait qu'un très faible effet sur la réduction des températures maximales intérieures. Cependant, elle était très efficace pour abaisser les températures maximales intérieures pour les bâtiments à masse élevée. Surtout pendant les périodes de vague de chaleur. Lors d'une journée extrêmement chaude, avec une température extérieure maximale de 38 ° C, la température maximale intérieure du bâtiment à masse élevée était seulement de 24,5 °C(une réduction de 13.5 °C).

Une étude menée par (E.Shaviv et al., 2001) évalue l'influence de la masse thermique et la ventilation nocturne sur la température intérieure maximale en été en différents endroits sous le climat chaud d'Israël. Une analyse pour la détermination de la réduction de la température intérieure maximale par rapport à la température extérieure maximale (T_{max}) a été effectuée en utilisant un modèle de simulation horaire ENERGY pour prédire la performance thermique du bâtiment. Les résultats de l'étude montrent qu'il est possible d'obtenir une réduction de 3-6 ° C dans un bâtiment lourd sans utiliser un moyen de climatisation. La réduction exacte obtenue dépend de la quantité de la masse thermique, du taux de ventilation nocturne et de l'écart de température du site entre le jour et la nuit.

(Solange Goulart , 2004) examine le rôle de l'inertie thermique comme technique de refroidissement dans le climat chaud-humide du sud du Brésil. L'objectif de cette étude est de connaître les limites et l'applicabilité de l'inertie thermique ainsi que les aspects à prendre

en compte lors de l'utilisation de cette stratégie dans ce climat. Une importance est accordée sur l'optimisation de l'inertie thermique sur les bâtiments résidentiels.

La performance de l'inertie thermique est évaluée d'abord par une expérience sur terrain, où quatre résidences avec différents niveaux d'inertie thermique ont été surveillées pendant la période estivale à Florianópolis. Deux maisons ont des murs à forte inertie (murs de pierre), une troisième est faite de matériaux conventionnels de construction (murs de brique) à inertie thermique moyenne et la quatrième maison a des murs en bois, caractérisant une faible inertie thermique. L'évaluation se fait à travers des profils de températures internes et d'humidité. Les études analytiques sont ensuite développées à l'aide de simulations numériques.

Quelques conclusions sont résumées ci-dessous:

- Les maisons ayant une inertie thermique plus élevée dans leurs composants ont montré une variation plus faible de la température intérieure par rapport à la variation externe. D'autre part, la température intérieure de la Maison 4 (paroi en bois) suit l'extérieur étroitement, atteignant presque les mêmes valeurs maximales et minimales en raison de la faible inertie thermique de toute son enveloppe.
- Un retard des pics de température interne par rapport aux pics de température externe est plus évident dans les deux maisons à forte inertie thermique (murs de pierre).
- Dans la maison 2, en maçonnerie classique (inertie thermique moyenne), la plage de température interne quotidienne est également inférieure à la variation externe, mais le pic de température interne se produit presque en même temps que le pic externe.
- La plus grande capacité thermique des maisons 1 et 3 (murs de pierre) diminue la variation des températures internes mais lorsque les températures extérieures descendent, l'intérieur reste chaud à cause de la chaleur stockée dans la masse.
- Les maisons à forte inertie thermique n'ont pas montré les meilleures conditions internes tout le temps. L'habitude de garder les portes et les fenêtres ouvertes pendant la journée endommage l'effet d'inertie à mesure que la température interne augmente en raison de l'air chaud qui entre.

-Pendant la nuit, les températures extérieures baissent jusqu'à 22° C, montrant qu'il existe un potentiel pour la technique de ventilation nocturne. La ventilation nocturne doit être prise en compte pour garantir la dissipation de la chaleur stockée dans la structure.

-Lorsque la ventilation nocturne a été appliquée, des réductions importantes de la température maximale interne ont été obtenues par rapport au bâtiment sans ventilation nocturne (des réductions de 5 ° C peuvent être atteintes).

Une autre étude réalisée par (S. Amos-Abanyie et al., 2013) dans le climat chaud-humide du Ghana montre que les effets combinés de la masse thermique, la taille de la fenêtre et de la ventilation nocturne peuvent réduire la température maximale de l'air intérieur et d'améliorer le confort thermique.

(Santamouris, D.N. Asimakopoulos Eds, 1996) a montré que les techniques de ventilation nocturne, lorsqu'elles sont appliquées à des bâtiments massifs, peuvent réduire considérablement la charge de refroidissement des bâtiments climatisés et augmenter le niveau de confort thermique des bâtiments non climatisés.

Selon (Geros et al., 1999) ,l'existence d'une importante masse thermo-structurelle augmente l'efficacité de la technique puisque l'inertie du bâtiment est augmentée et que l'effet de la ventilation nocturne peut être observé dans les profils de température intérieure du jour suivant, avec une température intérieure maximale plus basse et retardée. Les techniques de la ventilation nocturne sont basées sur l'utilisation de l'air ambiant frais comme dissipateur de chaleur pour diminuer la température de l'air intérieur ainsi que la température de la structure du bâtiment.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons dressé l'état de l'art de l'inertie thermique comme une propriété thermique propre à une construction. Le concept d'inertie thermique d'un mur ou d'une structure de bâtiment dans son ensemble est étroitement lié à son poids (B.Givoni, 1976) et aux phénomènes de transfert de chaleur conductif et aussi aux interfaces entre les parois et les ambiances thermiques attenantes. (Fabio Munaretto,2014).

L'effet de l'inertie thermique dans les bâtiments est le processus de stockage de chaleur, de distribution de la chaleur et de dissipation de la chaleur qui se produisent dans les murs et les toits des bâtiments pendant une certaine période de temps. La chaleur est stockée dans des éléments massifs provoquant une réduction des variations de température internes et un retard des températures maximales (C.Diaz 1994).

L'efficacité de cette propriété thermique dépend de divers facteurs, à savoir les conditions du climat, les propriétés thermiques des matériaux de construction, l'occupation et gains de chaleur internes, l'emplacement et distribution de l'inertie thermique, l'isolation thermique, les fenêtres, la ventilation.

Les résultats de travaux expérimentaux exposés dans ce chapitre, montrent tous l'importance de l'inertie thermique comme modérateur de l'environnement intérieur. En été l'inertie thermique:

- Assure l'atténuation des températures extérieures en évitant les surchauffes.
- Déphase dans le temps la pénétration de l'onde thermique.
- Stabilise les températures internes en gardant les conditions plus froides que l'extérieur

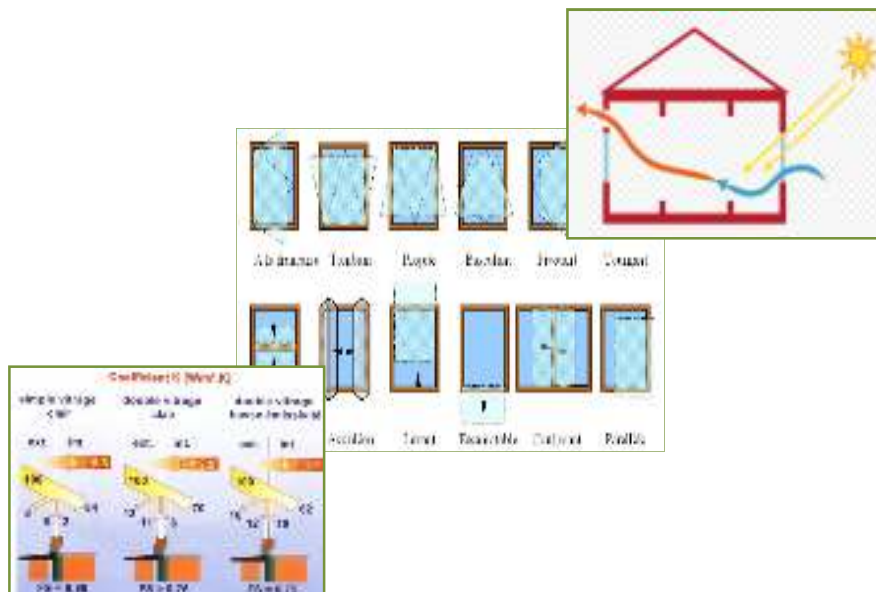
pendant les heures de jour.

Les études ont confirmé aussi que la performance de l'inertie thermique dépend aussi de la ventilation nocturne. Durant les nuits d'été, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. Elle décharge le bâtiment de la chaleur accumulée dans les parois en journée. D'après (Givoni ,1991), pour augmenter l'effet de refroidissement la nuit, le bâtiment devrait être fermé pendant la journée pour éviter d'amener l'air extérieur chaud dans les pièces.

02

IMPACT DE LA FENETRE SUR LE CONFORT THERMIQUE ET RESPIRATOIRE

CHAPITRE 02



Introduction

« Comment fais-tu une fenêtre? Mais, à propos, à quoi sert une fenêtre; sais-tu vraiment pourquoi on fait des fenêtres? Si tu le sais, tu vas pouvoir m'expliquer pourquoi on fait des fenêtres cintrées, carrées, rectangulaires, etc... Je veux des raisons à cela. Et j'ajouterais, tiens-toi bien : avons-nous besoin de fenêtres aujourd'hui? » Le Corbusier

« La fenêtre, - trace d'une existence humaine, clin d'œil au passant, œil de l'édifice ménageant le regard vers l'extérieur sans être vu, accueil de la lumière et du rayon de soleil qui anime surfaces et objets, sources d'air frais et parfois lieu d'échange de paroles et de senteurs, ... mais aussi vulnérabilité, fragilité due à l'interruption de la continuité structurelle du mur, sensibilité thermique et faiblesse d'étanchéité. Cette fenêtre est un élément fondamental de l'architecture. [...] La fenêtre sous-tend donc trois projets: un projet de lumière, un projet de vue et un projet d'articulation entre l'intérieur et l'extérieur ». (Pierre von Meiss, 1993)

Les fenêtres sont une partie essentielle des bâtiments. Elles ont un impact très important pour gérer le flux thermique et l'air frais. Elles assurent plusieurs fonctions : une connexion visuelle entre l'occupant et le milieu environnant, ventilation, éclairage, aération, protection.

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons à la définition de la fenêtre et ses principales composantes ainsi que les différents types de fenêtres. Nous essayerons aussi de déterminer les critères de performance de l'ensemble de la fenêtre, mais aussi d'identifier les différents paramètres de ce dispositif agissant sur le confort thermique et respiratoire des occupants à l'intérieur des bâtiments, en présentant des exemples pour chaque paramètre.

II.1- Définition de la fenêtre

D'après Larousse la fenêtre est une baie comportant une fermeture vitrée, pratiquée dans un mur d'un bâtiment pour permettre l'entrée de la lumière, la vision vers l'extérieur et, habituellement, l'aération.¹

(N. Benradouane et B. Benyoucef, 2008) définissent la fenêtre comme suit : « La fenêtre est un des plus complexes et coûteux composants du bâtiment bioclimatique dus au grand nombre de rôles contradictoires qu'elle doit jouer: éclairage et occultation, vue dehors et recherche d'intimité, pénétration du soleil et protection solaire, Etanchéité et ventilation. En plus des qualités techniques nécessaires pour assurer le confort thermique et visuel, la fenêtre doit définir l'organisation de l'espace intérieur et situer l'entrée de la lumière du jour ».

(Silvestre Jeronimo Celis Mercie, 2009) de son côté, la décrit comme étant: « une composante complexe et fondamentale des systèmes passifs de contrôle environnemental. Il s'agit d'un des principaux moyens qui permettent à l'occupant de modifier la température, l'éclairage diurne, le mouvement d'air et l'acoustique d'une pièce afin d'améliorer son confort environnemental ».

(Myal malika, 2010) définit la fenêtre comme suit : « Les fenêtres font références aux ouvertures dans l'enveloppe des bâtiments, elles permettent aux habitants de voir à l'extérieur et d'avoir un éclairage naturel confortable pendant la journée grâce aux rayons solaires. Certaines fenêtres permettent également de ventiler le bâtiment. Ces fonctions ont incité les architectes, lors de la construction ou la rénovation des bâtiments, à prévoir des fenêtres plus grandes, esthétiques, durables, faciles à mettre en place, et surtout moins chères ».

II.2- Evolution historique de la fenêtre

L'histoire de la fenêtre est marquée par un dialogue toujours renouvelé entre l'évolution technique des différents matériaux qui la composent, la recherche du confort des occupants et le rôle qu'elle joue dans la composition architecturale.²

¹ <http://www.larousse.fr>

² www.patrimoine.vd.ch

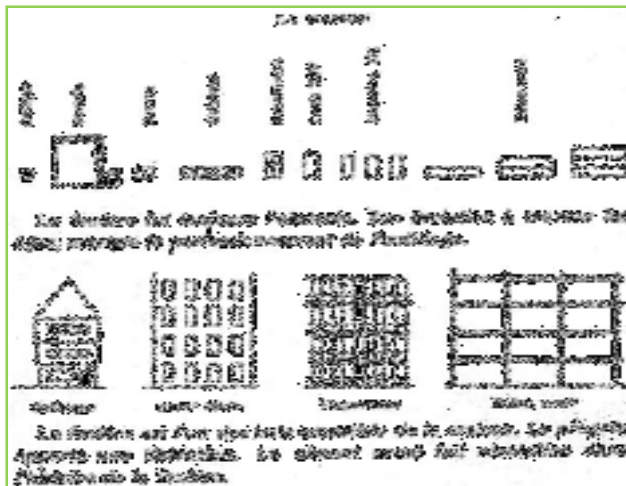


Figure II.1: L'histoire de la fenêtre

[Corbusier, 1926]

II.2.1-Moyen Age

Au Moyen Age la fenêtre est dotée de volets ajourés laissant passer la lumière par de simples trous qui peuvent, dans les cas les plus prestigieux, être dotés de petits vitraux constitués de simple verres dits en culs de bouteille, de parchemin tendu ou de papier huilé.

II.2.2-XVe et XVIe siècles

Au XVe siècle, pour répondre aux besoins de sécurité et de confort de l'époque, on crée des fenêtres spécifiques aux bâtiments civils, d'une conception totalement différente du châssis destiné aux constructions religieuses. Ces dernières se composent généralement d'un cadre à deux battants et à trois traverses. Un volet plein vient se loger du côté intérieur dans les feuillures. Ces fenêtres présentent des inconvénients majeurs: les infiltrations d'air et d'eau sont importantes.

II.2.3-XVIIe siècle

Il s'agit d'éléments de vitraux montés sur de simples cadres de bois, rigidifiés par des épars métalliques en équerre aux extrémités décorées. Le châssis n'est la plupart du temps pas décoré ou alors seulement d'un simple chanfrein. A partir du milieu du XVIIe siècle, les croisées de pierre sont peu à peu remplacées par des meneaux en bois et la fabrication du verre à vitre prenant une grande extension, les quadrillages se substituent aux structures des vitraux. Le verre d'alors est obtenu par soufflage d'un élément cylindrique que l'on fend dans la longueur et que l'on étend au four. On le reconnaît aux ondes déformantes et aux petites bulles qui le composent.

II.2.4-XVIII^e siècle

Dans les années 1720, les édifices prestigieux vont recevoir les premiers châssis à la française à deux vantaux ou à l'anglaise. Ces premiers châssis sont, la plupart du temps, dotés de petits carreaux dont les croisillons sont moulurés et sont assemblés au moyen de chevilles.

Les verres de ces fenêtres ont été apposés sans mastic, glissés dans une rainure au fur et à mesure de la construction de la fenêtre. La substitution des meneaux de bois par des fermetures à noix et gueule-de-loup, ainsi que l'introduction de la pièce d'appui et du renvoi d'eau constituent des modifications importantes de la menuiserie des fenêtres au XVIII^e siècle, en offrant une amélioration significative de l'étanchéité. C'est dans les vingt dernières années que l'on commence à voir des carreaux plus grands, tout d'abord sur les façades d'apparat. Dès lors, les techniques de fabrication des fenêtres ne changeront guère jusqu'à l'arrivée des premières menuiseries industrielles dans la deuxième moitié du XIX^e siècle.

II.2.5-Du milieu du XIX^e siècle

C'est la période des bouleversements dans la production des menuiseries due à la mécanisation des ateliers qui permet de répondre à la forte demande du marché et ceci sans nuire à la qualité des réalisations. En effet, les fenêtres construites durant cette période sont généralement d'une très belle facture. Ces fenêtres sont à simple vitrage, plus rarement à double vitrage, l'application d'une géométrie audacieuse (cintre, anse de panier, etc.) caractérisant les réalisations de prestige.

Le verre s'affine et la fenêtre s'agrandit avec la suppression des petits bois. L'étanchéité se perfectionne avec l'apparition du regingot qui évite le pourrissement de la pièce d'appui.

II.2.6-XX^e siècle

Au début du XX^e siècle, le verre étiré produit industriellement remplace rapidement le verre soufflé. Ce procédé est lui-même supplanté, depuis les années 1960, par le verre flotté qui est parfaitement transparent et sans défaut.

Les verres continuent de s'agrandir, généralisation de la crémone comme système de fermeture.

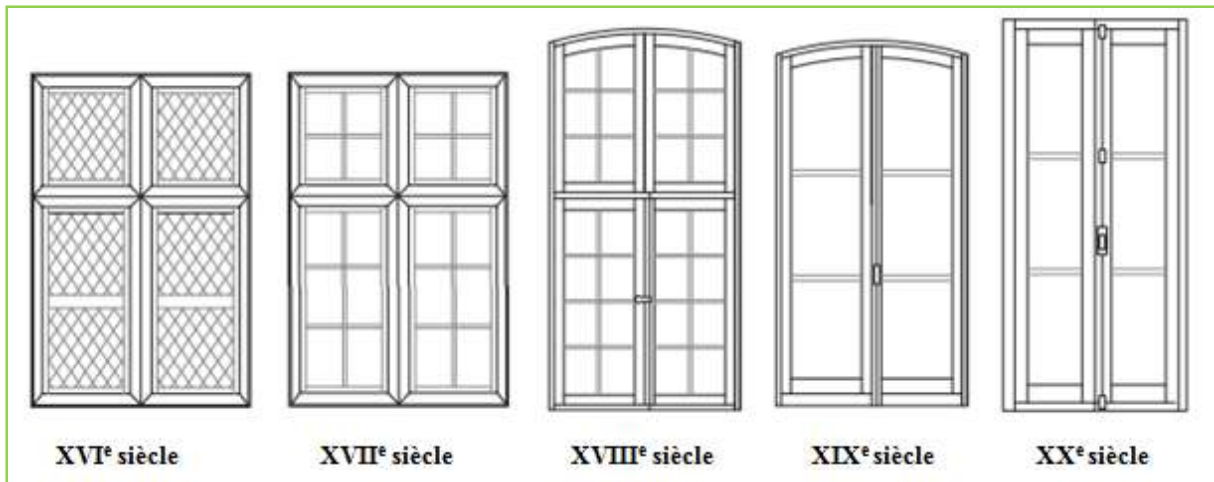


Figure II.2 : Evolution de la morphologie de la fenêtre du XVIème siècle à nos jours.

[www.patrimoine.vd.ch]

II.3- Structure et composition d'une fenêtre

Une fenêtre est une ouverture insérée dans l'enveloppe des bâtiments. Elle est destinée à laisser passer la lumière et l'air. Les différents éléments qui composent une fenêtre contribuent à l'amélioration des performances thermiques, lumineuse et acoustiques.

Les fenêtres comprennent un cadre constitué d'une partie fixe (dormant), et une partie mobile (ouvrant), ainsi qu'une unité scellée. L'unité scellée est la partie transparente d'une fenêtre qui laisse passer le rayonnement solaire à l'intérieur des bâtiments. La figure II.3 illustre les parties fixe et mobile du cadre d'une fenêtre typique. Ce cadre est composé de plusieurs cavités. Ces cavités permettent de réduire la quantité de matériaux nécessaire et augmente la résistance thermique de l'ensemble. L'étanchéité entre l'ouvrant et le dormant est assurée par un joint d'étanchéité qui a pour fonction principale de limiter les infiltrations d'air et d'assurer une protection contre l'eau et la neige.

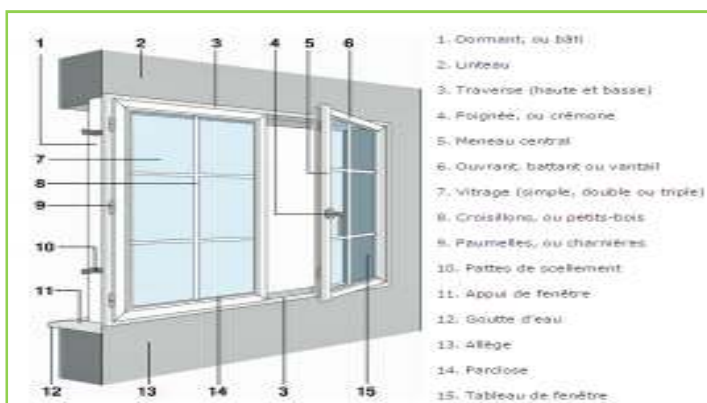


Figure II.3 : Les différents composants de la fenêtre [www.systemed.fr]

L'unité scellée est simplement formée de deux plaques de verre séparées par un intercalaire qui permet de maintenir une distance constante entre les plaques. Les intercalaires sont faits généralement d'aluminium ou de mousse rigide à faible conductivité thermique. Les intercalaires intègrent un dessiccant qui permet d'absorber la vapeur d'eau contenue dans la cavité formée par l'unité scellée. La cavité entre les plaques est normalement remplie d'air. Cependant, on retrouve des fenêtres remplies d'argon, de krypton ou de dioxyde de carbone. Ces gaz « spéciaux » ont une conductivité thermique légèrement plus faible que celle de l'air.

Le cadre et le châssis constituent en général le tiers de la surface totale des fenêtres, d'où la nécessité d'utiliser un matériau résistant et idéalement isolant pour permettre un entretien facile, prolonger la durée de vie et minimiser les déperditions de chaleur (Myal malika,2010).

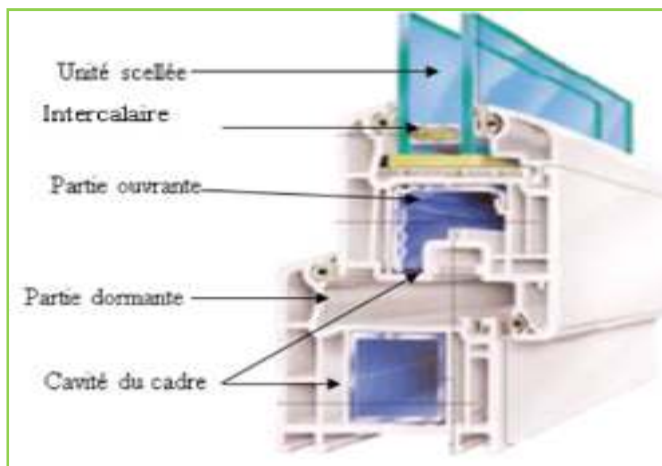


Figure II.4 : Présentation schématique d'une fenêtre [Myal malika,2010]

II.4- Les différents types de fenêtres

Les types de fenêtres sont divers et variés. Tant par leur forme et leur taille que par le type d'ouverture.

II.4.1- Selon la forme

Pour les formes, il existe plusieurs types, à savoir la fenêtre carrée ou rectangulaire qui est la forme la plus demandée, la fenêtre dite cintrée qui est une fenêtre droite avec le rebord supérieur arrondi, la fenêtre arrondie ou œil de bœuf, et en fin la fenêtre triangulaire qui est moins fréquente et que l'on retrouve au niveau des toitures. D'autres formes existent comme la fenêtre plein cintre, la fenêtre arc surbaissé, la fenêtre trapézoïdale, la fenêtre ovale, la fenêtre demi-lune...etc.

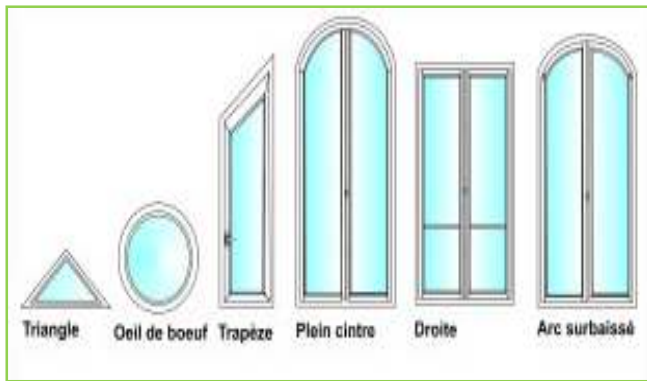


Figure II.5 : Les différentes formes de fenêtres

[<http://manach-fermetures.com>]

II.4.2- Selon la taille

Concernant les tailles, il existe différentes dimensions standard pour les fenêtres. Par exemple, les fenêtres à dimensions réduites (30x30 ou 40x40), Les fenêtres hautes (80x40) et les fenêtres larges...etc. Il existe aussi des fenêtres avec des dimensions personnalisées et adaptées à chaque bâtiment.

II.4.3- Selon le système d'ouverture

Les systèmes d'ouverture des fenêtres sont divers et variés, Il en existe plus de 10 sortes. Le choix du système d'ouverture dépend du style du bâtiment, de la facilité d'utilisation, mais aussi de la sécurité. La figure II.6 illustre les différentes typologies des fenêtres selon le système d'ouverture.

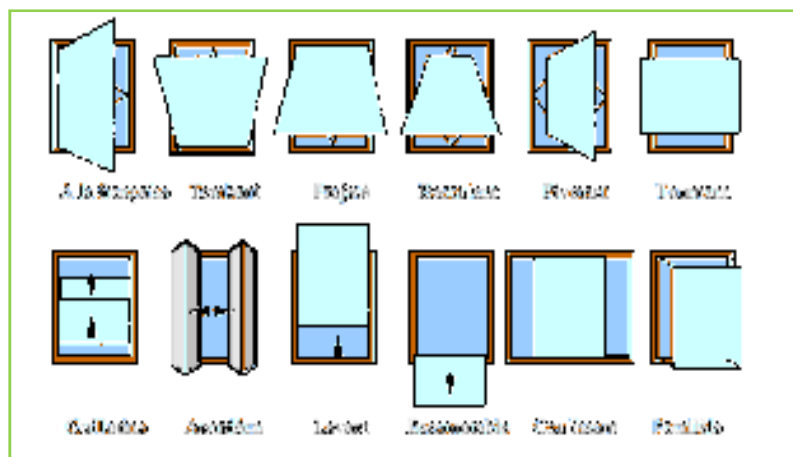


Figure II.6 : typologie des fenêtres selon le système d'ouverture. [Tareb ,2004]

II.5- Fenêtres entre rôle et exigences

Les différentes exigences que doit remplir une fenêtre (lumière, air, soleil, vue sur l'intérieur, sur l'extérieur et à travers, ainsi que la possibilité de privilégier certains points de vue) confèrent à cet élément un potentiel inépuisable.

Une fenêtre peut satisfaire une ou plusieurs de ces exigences. C'est tantôt un élément simple, modeste, tantôt un assemblage complexe de composants qui répond, dans son ensemble, à divers impératifs. Elle n'est pas qu'une simple surface. Sous forme de façade à plusieurs couches ou par activation de dispositifs de régulation (protection solaire, orientation de la lumière, etc.), elle peut s'étendre sur l'intérieur ou sur l'extérieur. Ainsi, la façade s'adapte aux particularités spatiales et réagit aux états changeants de l'intérieur du bâtiment ou du monde extérieur. (Roberto Gonzalo et Karl J. Habermann ,2006)

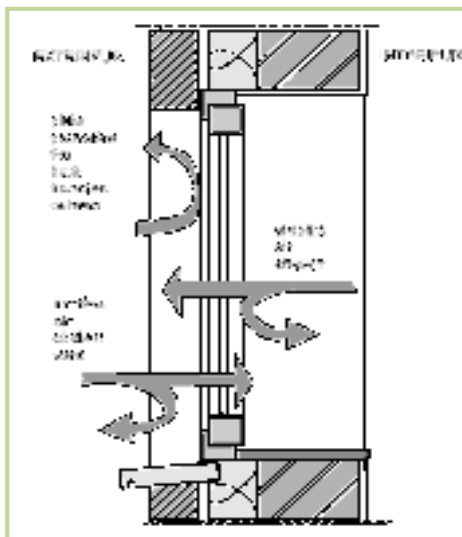


Figure II.7 : Les exigences de la fenêtre

[JM Hauglustaine et al.,2001]

La fonction première de la fenêtre est de permettre le passage de la lumière pour la vision vers l'extérieur et pour la valorisation des apports solaires. A partir de ces caractéristiques, on recherche à optimiser certaines propriétés(François Alain Frédéric Gloriant,2014) :

- **l'isolation thermique:** Il s'agit avant tout d'éviter les pertes excessives de chaleur mais également de se prémunir des surchauffes éventuelles lorsque les apports solaires sont trop importants.
- **l'étanchéité:** La fenêtre doit en général pouvoir s'ouvrir et se fermer, la zone entre l'ouvrant et le châssis constitue alors une zone sensible. Le problème d'étanchéité intervient également entre le châssis et la paroi opaque.

- **la résistance:** Une fenêtre doit pouvoir perdurer dans le temps et résister aux diverses agressions liées notamment à l'humidité et aux efforts mécaniques.

II.6- Les modes de transfert thermique dans une fenêtre

La fenêtre entretient d'importants échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur, mais aussi avec les occupants. La température de surface de la fenêtre, le rayonnement solaire, ainsi que le mouvement d'air en provenance de la fenêtre sont les principaux paramètres qui influencent la sensation thermique de l'occupant. (Silvestre Jeronimo Celis Mercie, 2009)

La quantité de rayonnement solaire à travers la fenestration d'un bâtiment dans l'espace intérieur est un facteur clé dans l'évaluation du confort intérieur et l'énergie éventuelle utilisée pour refroidir ces espaces. (C. Koranteng, 2015)

Dans une fenêtre, les trois modes de transfert thermique sont présents. La conduction se trouve dans les parties solides de la fenêtre et elle se qualifie comme étant le mode principal de transfert thermique au niveau du cadre. Le deuxième mode de transfert thermique est la convection. C'est un phénomène d'échange de chaleur sous l'effet du mouvement d'un fluide. Ce mouvement peut être forcé ou naturel (sous l'effet de la variation de la masse volumique avec la température). Sur la surface d'une fenêtre située du côté intérieur, la convection s'effectue généralement en régime naturel contrairement au régime de convection forcé qui est généralement dominant du côté extérieur.

Le gaz présent dans l'unité scellée est soumis à une différence de température. Si la différence de température entre les plaques de verre dépasse un certain seuil, ce gaz se met en mouvement naturellement (poussée d'Archimède) créant ainsi une boucle de convection qui augmente le transfert de chaleur entre les surfaces du vitrage diminuant par conséquent, la résistance thermique de l'unité scellée et de la fenêtre dans son ensemble.

Le dernier mode de transfert de chaleur, mais non le moindre est le rayonnement. Le transfert de chaleur par rayonnement désigne le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. En fait, le rayonnement est le mode de transfert de chaleur le plus important dans une fenêtre. Dans une fenêtre typique, près des deux tiers du transfert de chaleur total s'effectue par rayonnement. (Myal malika, 2010)

La figure II.8 illustre schématiquement les trois modes de transfert se produisant dans une fenêtre.

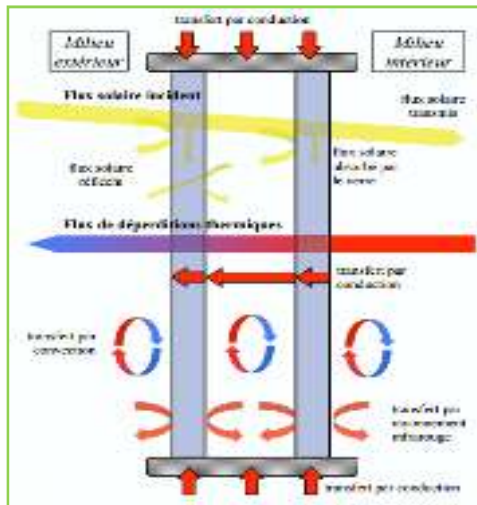


Figure II.8 : Schéma des différents types de transfert thermique au sein d'une fenêtre à double vitrage pendant la saison de chauffe (Text < Tint) [François Alain Frédéric Gloriant,2014]

II.7- Critères de performance de l'ensemble de la fenêtre

On distingue trois grandeurs principales pour l'analyse thermique de l'ensemble de la fenêtre (vitrages + cadres). Tout comme pour les parois opaques, les fenêtres doit être performante, des points de vue : Thermique, isolation, ventilation, lumière, acoustique ...etc.

II.7.1- Le coefficient de transmission thermique U_w

Le coefficient de transmission thermique U_w , en $W/(m^2.K)$, définit la performance de l'isolation thermique de la fenêtre. Ce coefficient varie en fonction :

- De la performance thermique du cadre, caractérisée par le coefficient U_f . D'une manière générale, ce sont les cadres en PVC qui sont les plus performants, suivi de près par le bois. Les fenêtres en métal, comme l'aluminium, sont généralement moins performantes
- De la performance thermique du vitrage, caractérisée par le coefficient U_g (simple vitrage, double vitrage, etc.).
- De la performance thermique de la liaison entre le vitrage et le cadre, caractérisée par le coefficient (Ψ_g)

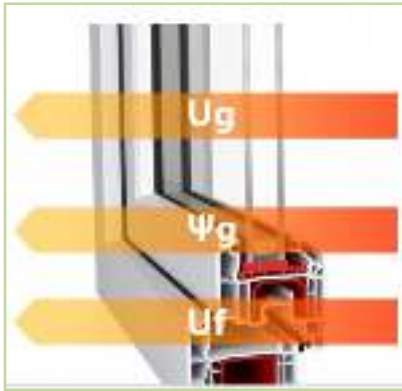


Figure II.9 : Illustration du coefficient de transmission thermique [www.fenetre123.fr]

Le coefficient U_w est l'inverse de la résistance thermique. Il mesure la transmission thermique, c'est à dire la quantité de chaleur/froid qui passe à travers la fenêtre. Plus le coefficient U_w est faible, meilleure sera l'isolation et donc meilleure sera la performance de la paroi vitrée. Le coefficient U_w est le rapport entre les différents coefficients de transmission thermique (U_g , U_f et Ψ_g) rapporté à la surface totale de la fenêtre.³

$$U_w = \frac{U_g \times \text{surface vitrage} + U_f \times \text{surface cadre} + \Psi_g \times \text{périmètre vitrage}}{\text{Surface totale fenêtre}} \dots\dots\dots \text{Eq II-1}$$

Avec :

U_g : coefficient de transmission thermique du vitrage

U_f : coefficient de transmission thermique du cadre

Ψ_g : coefficient de transmission thermique linéique de la liaison vitrage/cadre de la fenêtre

II.7.2- Le facteur solaire S_w

Le facteur solaire S_w mesure la capacité d'une fenêtre à transmettre la chaleur du soleil à l'intérieur d'un local. Le coefficient S_w n'a pas d'unité de mesure, il est compris entre 0 et 1. $S_w = 0$ correspond à une fenêtre qui ne transmet pas la chaleur du soleil. A l'inverse, $S_w = 1$ correspond à une fenêtre qui transmet l'intégralité de l'énergie du soleil

Le facteur solaire S_w est le rapport entre l'énergie solaire passant à travers le vitrage et l'énergie solaire incidente. Plus le coefficient S_w est élevé, plus la fenêtre laissera passer l'énergie solaire.

³ www.e-rt 2012.fr



Figure II.10 : Illustration du facteur solaire Sw

[www.fenetre123.fr]

Généralement les vitrages bien isolés (U_w faible) sont opaques et ont des coefficients Sw plutôt faibles, ce qui limite les apports solaires.³

II.7.3- Le facteur de transmission lumineuse TL_w

Le facteur de transmission lumineuse TL_w , définit la capacité de la fenêtre à transmettre le rayonnement lumineux d'origine solaire à l'intérieur d'un local. Le coefficient TL_w est un pourcentage. Il est compris entre 0 et 100.

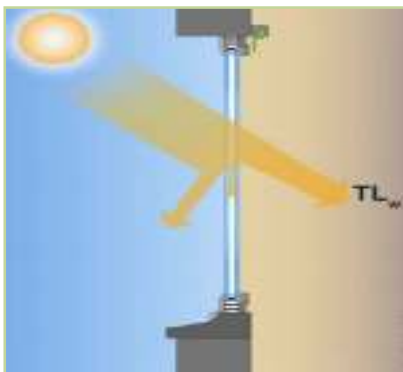


Figure II.11 : Illustration du facteur de transmission lumineuse TL_w [www.fenetrealu.com]

Le facteur de transmission lumineuse TL_w est le rapport entre la lumière passant à travers le vitrage et la lumière incidente. Plus le coefficient TL_w est élevé, plus la quantité de lumière qui traverse le vitrage sera élevée.³

II.8-Propriétés optiques du vitrage

Il existe plusieurs types de vitrages. Afin de bien les différencier, il est important de comprendre leurs propriétés, qui peuvent avoir un impact significatif sur le bilan thermique de la construction.

Lorsque la radiation solaire tombe sur du verre ou des matériaux translucides une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, une partie est absorbée par les matériaux et le reste est transmis à l'intérieur du bâtiment. (D. G .Stephenson,1964)

- La partie de l'énergie incidente qui est réfléchiée par le matériau. Elle est caractérisée par le facteur de réflexion ρ ,
- La partie qui est absorbée par le matériau Elle est caractérisée par le facteur d'absorption α ,
- La partie qui est transmise à l'intérieur du bâtiment. Elle est caractérisée par le facteur de transmission τ ,

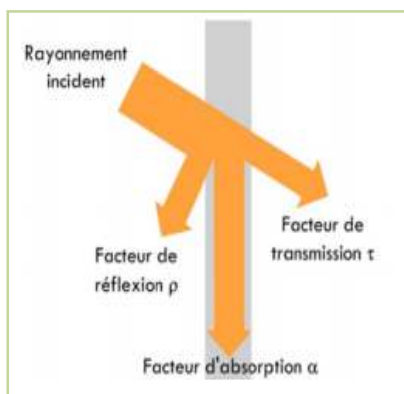


Figure II.12 : Illustration du comportement du rayonnement solaire au contact d'une fenêtre [FFB, fermeture et store,2012]

II.8.1- L'absorptivité (α)

L'absorptivité (ou coefficient d'absorption) représente la fraction du rayonnement incident qui est absorbée par le verre. Ce rayonnement absorbé se transforme en chaleur en augmentant ainsi la température du verre.

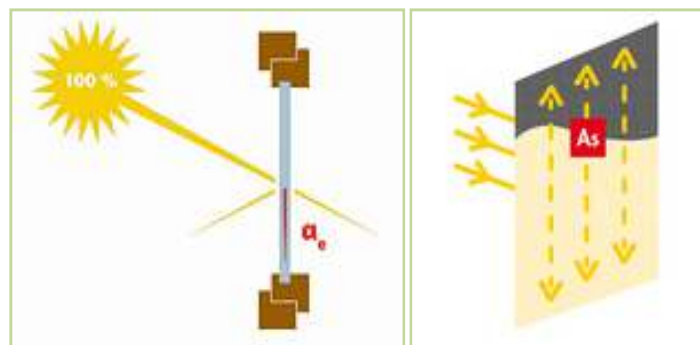


Figure II.13 : Illustrations du coefficient d'absorption(α)

[www.isotra.cz/fr ; www.sunscreen-mermet.fr]

En pratique, le coefficient d'absorption dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident, et de l'angle d'incidence de ce rayonnement par rapport à la surface vitrée. Certaines unités scellées sont constituées de vitrage sur lequel on a appliqué une couche ayant une absorptivité élevée dans le domaine infrarouge. Ces unités sont habituellement utilisées dans les climats chauds.(Myal malika,2010)

II.8.2- La réflectivité (ρ)

C'est le rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi et du rayonnement incident. La réflectivité (ou coefficient de réflexion) dépend du type de verre, de l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la normale au vitrage et de la longueur d'onde.(Myal malika,2010)

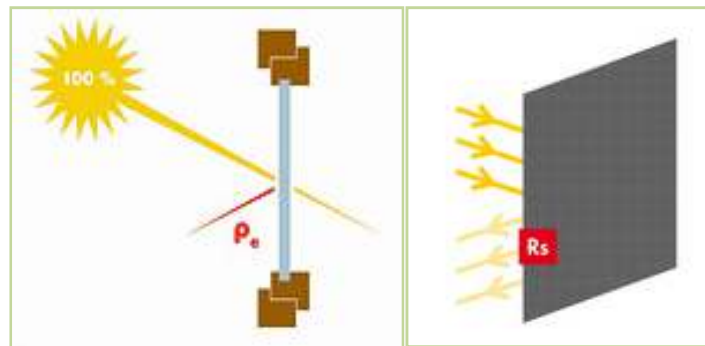


Figure II.14 : Illustrations du coefficient de réflexion(ρ)

[www.isotra.cz/fr ; www.sunscreen-mermet.fr]

Quelque soit le type de verre, plus l'angle d'incidence est grand, plus l'intensité du rayonnement réfléchi est importante. Le coefficient de réflexion peut être augmenté en appliquant une couche métallique réfléchissante.(Myal malika,2010)

II.8.3- La transmissivité (τ)

La transmissivité représente la fraction du rayonnement incident qui traverse directement un milieu sans interagir avec ce dernier. La transmissivité d'un vitrage varie selon la longueur d'onde du rayonnement incident. Un verre qui transmet les rayons visibles permet d'avoir un éclairage naturel, et un apport de chaleur. La loi de conservation de l'énergie impose que les coefficients de transmissivité, d'absorptivité et de réflectivité obéissent à la relation suivante(Myal malika,2010):

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \dots\dots\dots \text{Eq II-2}$$

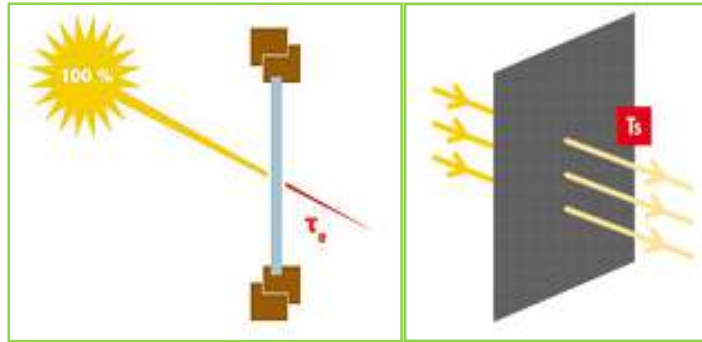


Figure II.15 : Illustrations du coefficient de transmission (τ)

[www.isotra.cz/fr ; www.sunscreen-mermet.fr]

Pour les fenêtres ordinaires l'absorption est très petite mais la transmission très grande. On ne se rend pas toujours compte, cependant, que la réflexion provenant d'une surface de verre varie beaucoup selon l'angle d'incidence, c'est-à-dire l'angle formé entre les rayons de la lumière et une ligne perpendiculaire à la surface.

La figure II.16 montre la variation de la réflexion, de l'absorption et de la transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire. Les valeurs, à midi, des angles d'incidence pour un mur sud à Ottawa montrent que la transmission aura une valeur maximum quotidienne de 70% de la radiation incidente au milieu de l'été et que cette radiation augmentera jusqu'à 85% à l'équinoxe et atteindra un maximum de 87% à midi, au milieu de l'hiver (D. G .Stephenson,1964)

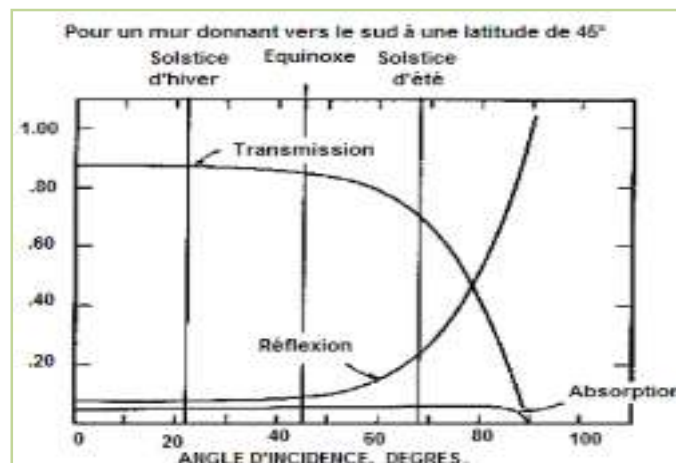


Figure II.16 : Absorption, réflexion et transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire. [Stephenson. D. G, 1964]

II.9- Le contrôle des apports solaires

Les parois vitrées constituent des sources considérables des apports en éclairage et en chaleur. En période estivale l'impact incontrôlé des apports de chaleur transmise au travers de vitrages influe sur le confort thermique intérieur des occupants et provoquer des surchauffes par l'augmentation de la température des surfaces ensoleillées. Les effets thermiques d'une paroi vitrée dépendent de la présence ou l'absence d'un dispositif de protection solaire.

La protection solaire est donc un dispositif fondamental dans la conception des constructions thermiquement et énergétiquement performantes. Ce dispositif peut améliorer le confort thermique des occupants en limitant l'exposition solaire et réduisant le flux de chaleur pénétrant à l'intérieur afin de limiter l'échauffement des locaux.

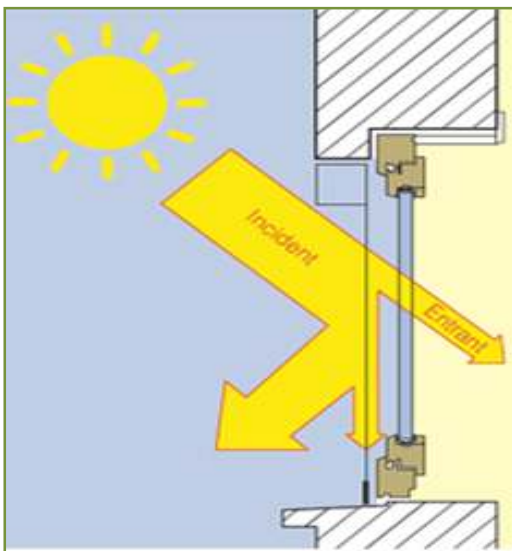


Figure II.17 : Transmission de l'énergie solaire à travers une baie vitrée munie d'une protection solaire [CSTC]

II.9.1- Fonctions principales des dispositifs de protection solaire

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée. Les protections solaires ont pour but de :

- Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Si l'on identifie un problème de surchauffe, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre.
- Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres (modifie les caractéristiques de transmission thermique des vitrages).
- contrôler l'éblouissement. (A.Liébard et A.De Herde,2004)

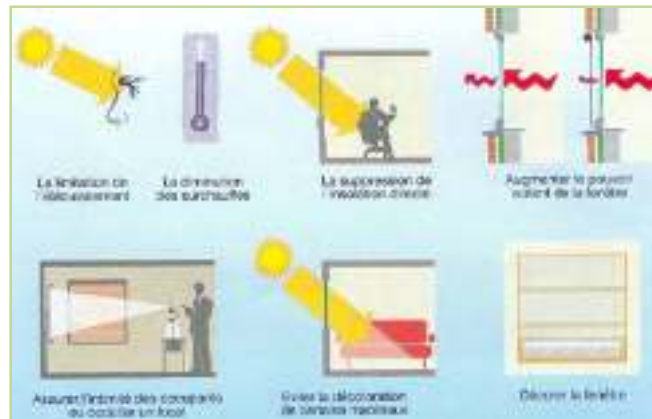


Figure II.18 : Fonctions des protections solaires

[Liébard,2004 cité par Alkhouli,2006]

II.9.2- Choix du type de la protection solaire

Le choix d'un dispositif de protection solaire peut varier selon plusieurs critères liés aux confort thermique et visuel. Ce dispositif d'ombrage peut être groupé en trois catégories:

- Les dispositifs qui sont situés à l'intérieur du vitrage.
- Les dispositifs qui tirent parti des propriétés du vitrage.
- Les dispositifs qui sont situés à l'extérieur du vitrage.

Le choix d'une stratégie de protection solaire est déterminé par le site et la localisation du bâtiment, son type, son usage, les conditions climatiques, d'ensoleillement et les autres sources d'éclairage (tel que l'éclairage urbain). Les stratégies globales de refroidissement, de chauffage, d'éclairage et de ventilation influencent également le choix des dispositifs de protection solaire.⁴

II.9.2.1- Les dispositifs de protections solaires intérieures

Les dispositifs de protection solaire intérieurs protègent les occupants d'un local contre les effets directs du rayonnement solaire et l'éblouissement. Ils ont l'avantage de pouvoir rester ouverts la plupart du temps et tirer seulement quand l'incidence du soleil le nécessite, mais les gains solaires demeurent un problème, particulièrement pour les façades ouest.

⁴ TAREB, Intégration Architecturale. Enveloppe du bâtiment, Chapitre 2.en ligne https://www.newlearn.info/packages/tareb/docs/lea/lea_ch2_fr.pdf

Les dispositifs de protection solaire intérieurs sont moins efficaces que ceux placés à l'extérieur car le rayonnement solaire pénètre à l'intérieur du bâtiment. Il est impossible d'éviter une absorption de ce rayonnement sur les éléments opaques ou transparents et la chaleur ainsi créée devra être dissipée par ventilation ou refroidissement.⁴

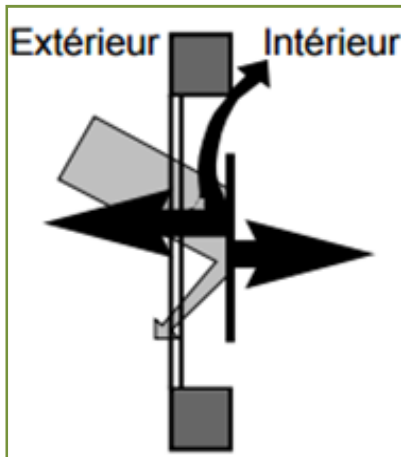


Figure II.19 : Représentation schématique d'une baie vitrée avec protection solaire intérieure. [Simon, JM Hauglustaine et all ,2001]

Les protections solaires intérieures comprennent les stores à rouleaux, les stores vénitiens ou les rideaux ordinaires. Elles sont peu efficaces sur le plan thermique. En effet, lorsque le rayonnement solaire a traversé le vitrage, il se trouve partiellement piégé et chauffe l'air entre la vitre et la protection (effet de serre). Ces protections intérieures sont surtout utiles pour lutter contre l'éblouissement. Elles doivent être associées à des protections extérieures.



Figure II.20 : Stores vénitiens
[www.ruedustore.fr]



Figure II.21 : Stores à rouleaux
[www.archiexpo.fr]

La couleur des protections intérieures opaques doit être claire pour gagner en efficacité.⁵ La figure II.22 indique que l'occultation intérieure sombre est la moins efficace, suivie d'une occultation intérieure claire. Concernant la position de l'occultation vis-à-vis du vitrage, l'occultation extérieure est toujours meilleure.

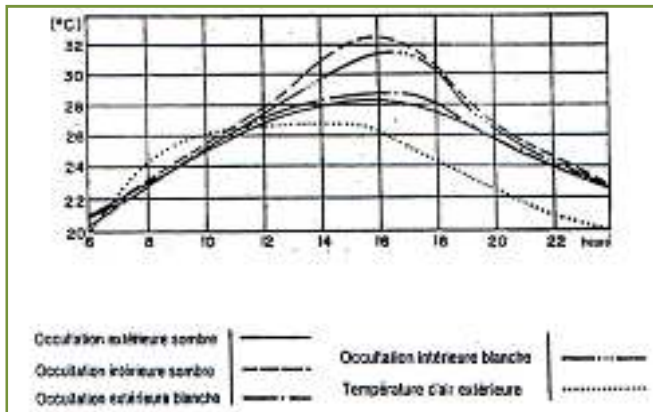


Figure II.22 : Régimes de températures intérieures pour différents systèmes d'occultation.

[B.Givoni,1978]

II.9.2.2- Les dispositifs de protection solaire fondés sur les propriétés de transmission du vitrage

Certains types de vitrage permettent de réduire considérablement la quantité de rayonnement solaire incident. Le coefficient de transmission solaire permet de quantifier cette propriété. Ce coefficient est le rapport entre l'énergie solaire qui traverse complètement le vitrage et l'énergie solaire incidente. On exprime souvent ce coefficient sous forme de pourcentage : 100% représentant la totalité de l'énergie incidente. L'énergie non transmise est soit réfléchiée, soit absorbée (donc transformée en chaleur) par le vitrage. (Donald watson et roger camous,1983)

Il existe actuellement deux types de verres de contrôle de l'énergie solaire:

- Les verres absorbants (verres teintés).
- les verres à couches réfléchissantes.

Ces deux fonctions peuvent être combinées dans un même vitrage.⁶

⁵ Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne. Les protections solaires, 2010.

⁶ Glaverbel.(2004) « Verre et contrôle solaire».

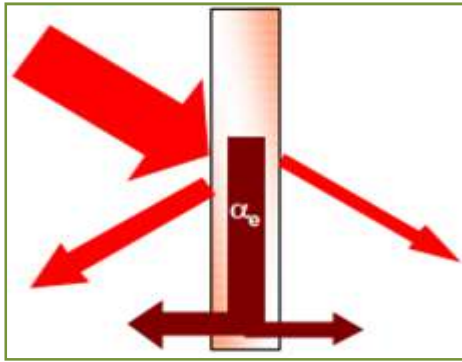


Figure II.23 : Verre absorbant
[Glaverbel,2004]

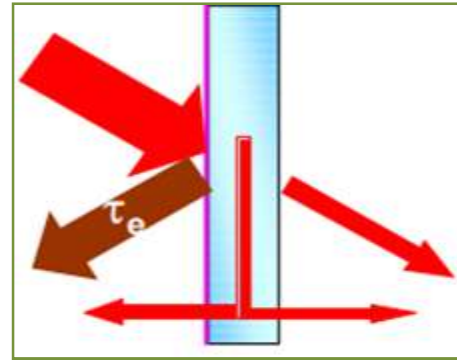


Figure II.24 : Verre réfléchissant
[Glaverbel,2004]

Les verres teintés réduisent la transmission du rayonnement essentiellement par absorption. Le vitrage monte alors en température et il n'est pas rare d'observer des températures des verres de 15 à 20 C° au-dessus de la température de l'air ambiant. Le vitrage devient alors une source de chaleur et au cours de périodes très chaudes, le confort thermique des occupants peut être affecté considérablement. Les verres réfléchissants permettent de limiter ce problème car la plus grande partie de l'énergie non transmise sera réfléchi et non absorbée. Cependant, la technologie des couches réfléchissantes appliquées sur les verres est beaucoup plus complexe et chère que celle des verres absorbants.

Le principal inconvénient de ces techniques est leur rigidité. L'ombrage du vitrage est non sélectif, et les gains solaires d'hiver seront autant bloqués que les gains solaires d'été. (Donald watson et roger camous,1983)

II.9.2.3- Les dispositifs de protection solaire extérieurs

Elles sont beaucoup plus performantes d'un point de vue thermique que les protections intérieures. En effet, de par sa position, la protection solaire absorbe, réfléchit (et transmet dans certain cas) le rayonnement solaire incident. Lorsque cette protection solaire se trouve du côté extérieur du vitrage, elle arrête les rayons incidents et l'échauffement de la protection n'a que peu d'influence sur le climat intérieur. Ces protections extérieures doivent être spécialement étudiées car elles sont soumises aux perturbations atmosphériques et diverses telles que le vandalisme et la pollution. (JM Hauglustaine et al.,2001)

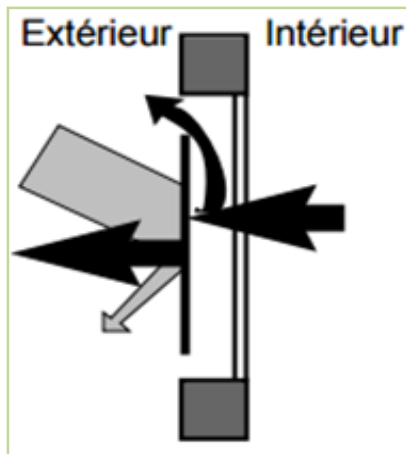


Figure II.25 : Représentation schématique d'une baie vitrée avec protection solaire extérieure. [JM Hauglustaine et al ,2001]

Cette catégorie de dispositifs d'ombrage est constituée par deux types de protection solaire : fixes ou mobiles, qui sont fixés à l'extérieur du cadre de la fenêtre.

a. Les dispositifs de protection solaire fixes

Les dispositifs de protection solaire fixes sont des éléments architecturaux majeurs et ils permettent d'articuler les façades des bâtiments. De nombreux architectes ont utilisé des dispositifs de protection solaire fixes comme élément déterminant de leur expression architecturale.

Les avancées horizontales (casquettes) sont les plus communes des protections solaires fixes et c'est le système le plus simple pour contrôler le rayonnement solaire direct pour les incidences fortes (proches de la verticale).

Dans la conception des dispositifs de protection solaire fixes, l'orientation de l'ouverture est le point clé. S'ils sont correctement dimensionnés et utilisés en façade sud, les avancées horizontales permettent d'obtenir une protection totale en milieu d'été tout en permettant une pénétration du soleil en hiver. Pour être plus efficaces (pour mieux contrôler les incidences basses du matin et du soir) les avancées doivent s'étendre suffisamment de chaque côté de l'ouverture. La longueur de débordement est déterminée par la largeur de l'ouverture, la latitude du lieu et la distance verticale entre l'avancée et la fenêtre.⁴

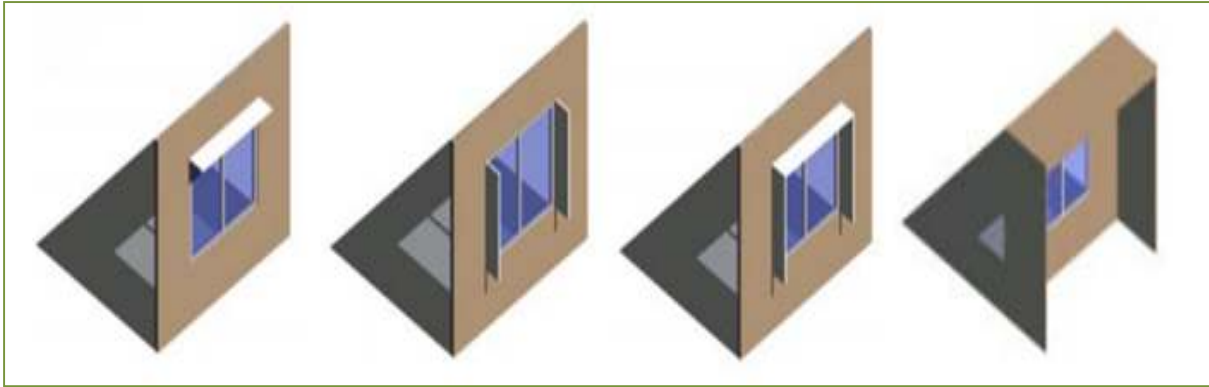


Figure II.26 : Protections solaires fixes [Berkeley, 2006]

b. Les dispositifs de protection solaire mobiles

Les protections mobiles sont d'une grande variété possible, en fonction des objectifs à atteindre et des options architecturales : toiles, stores à lames, volets pleins ou persiennes, à ouvertures traditionnelles, roulants, coulissants, suspendu.

L'efficacité des protections mobiles dépend de leur emplacement par rapport au vitrage, de leur opacité et des possibilités de ventilation de l'espace entre la fenêtre et la protection (une bonne ventilation évite l'effet radiateur). D'une manière générale, les coûts d'investissement sont plus élevés pour les protections mobiles que pour les protections fixes, de même que les coûts de maintenance et d'entretien.⁵

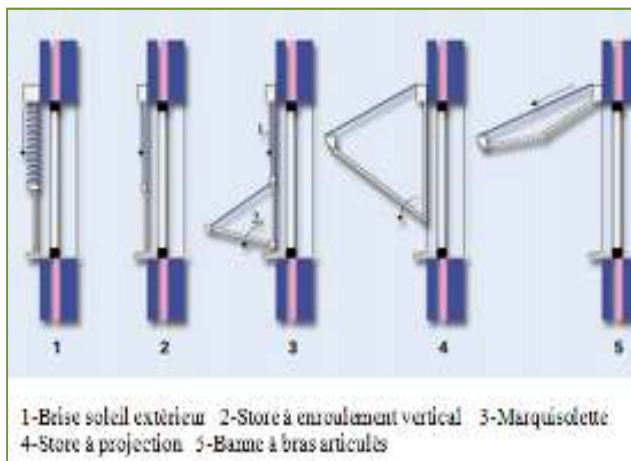


Figure II.27 : Représentation schématique de différents systèmes de protections solaires extérieures mobiles. [CSTC]

II.10- Impact de la fenêtre sur l'environnement intérieur

La fenêtre représente un élément primordial influençant grandement la qualité d'un intérieur et de l'espace urbain, ainsi que les interactions sociales. D'un point de vue architectural, la fenêtre permet en premier lieu de rendre un espace habitable en lui apportant l'air et la lumière nécessaires à l'habitation et de relier le logement à la rue. (Anna Zurbuchen ,2013)

La fenêtre entretient d'importants échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur, mais aussi avec les occupants. La température de surface de la fenêtre, le rayonnement solaire, ainsi que le mouvement d'air en provenance de la fenêtre sont les principaux paramètres qui influencent la sensation thermique de l'occupant. (Silvestre Jeronimo Celis Mercie,2009)

II.10.1- La fenêtre et le confort thermique

Comme toute paroi, les fenêtres laissent plus ou moins passer plusieurs sortes d'ondes : sonores avec le bruit, visibles avec la lumière, invisibles (infrarouges) avec la chaleur.⁷ Elles influent sur la performance thermique du bâtiment d'une manière substantielle, et cela par deux façons: d'une part par une augmentation de la perte de chaleur de transmission à travers l'enveloppe, et d'autre part par une augmentation des gains de chaleur solaire.(Adrian Trząski et al.,2014)

La transmission solaire à travers les fenêtres peut fournir un chauffage gratuit pendant la saison de chauffage, mais cela peut provoquer une surchauffe de la maison pendant la saison de refroidissement.⁸

II.10.1.1-Les paramètres de la fenêtre affectant la performance thermique

Les fenêtres jouent un rôle prépondérant pour créer un environnement intérieur confortable. Elles constituent des sources considérables d'apports thermiques et solaires. Les fenêtres ont un impact prépondérant pour améliorer leur effet sur les ambiances thermique intérieures, réduisant ainsi le coût des consommations d'énergie pour le refroidissement. De nombreux chercheurs ont indiqué que la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment dépend de plusieurs paramètres de ce dispositif d'ouverture, notamment l'orientation de la

⁷ Pierre Levy et al .(2011) «Guide sur les reprises de fenêtres en bois dans le bâti ancien».

⁸ U.S. Department of Energy, What's New in Building Energy Efficiency, Selecting Windows for Energy Efficiency, 1997.

fenêtre, la forme, la position, type et propriété du vitrage, la dimension et le dispositif d'occultation.

a. Effet de l'orientation des fenêtres

L'orientation est le facteur principal dans la conception des fenêtres puisqu'elle fait référence à la situation géographique du bâtiment et détermine la quantité d'énergie solaire et de lumière naturelle reçue. (Bouchahm guermia et Bourebia fatiha,2010)

Les ouvertures sont des lieux privilégiés pour les échanges de la chaleur. Sa taille et son orientation sont parmi les facteurs les plus importants qui affectent l'ambiance intérieure. La meilleure orientation requise des fenêtres et celle qui reçoit la quantité maximale de rayonnement solaire en hiver et la quantité minimale en été. (Bellara Samira,2005)

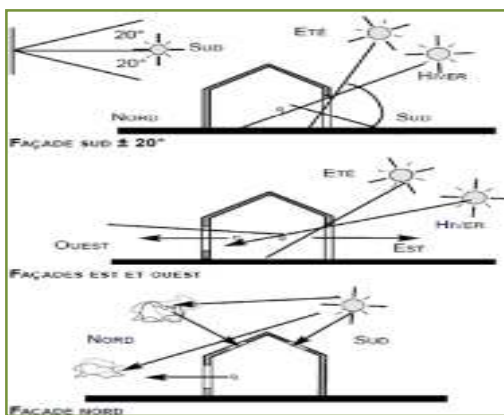


Figure II.28 : Ouvertures et leurs orientations

[Simon et al, 2001]

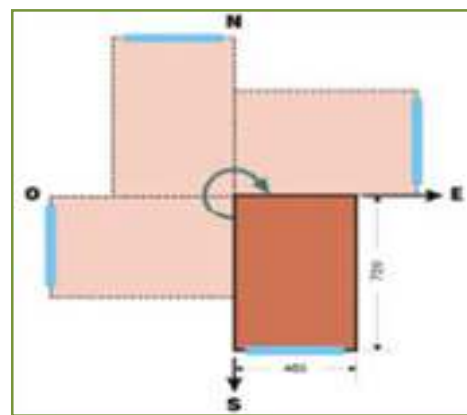


Figure II.29 : Différentes orientations des fenêtres.

[Bodart.M, De Herde. A., 1999]

D'après (N. Benradouane et B. Benyoucef ,2008):

- L'orientation Sud est toujours favorable. La façade Sud doit abondamment s'ouvrir.
- Les orientations Sud-Est et Sud-Ouest sont encore favorables, mais des précautions s'imposent notamment en altitude.
- Les orientations Est et Ouest ne seront jamais favorables, sauf avec certains types de vitrages. Trop de surface à l'Ouest conduit à des surchauffes en été. Les ouvertures sur cette façade seront donc dimensionnées au plus juste pour satisfaire aux conditions de l'éclairage naturel. On pourra accepter à l'Est des surfaces de vitrage qui apporteront le matin un éclairage et un peu de chaleur très agréables.

- L'orientation Nord n'est jamais favorable. Les ouvertures sur cette façade seront minimales. Et la dispersion intérieure du faisceau lumineux est importante pour bien répartir la chaleur.

Les effets de l'orientation de la fenêtre sur les conditions thermiques intérieurs ont été menés par de nombreux chercheurs dans différents secteurs et différents climats. (B.Givoni, 1994) déclare que le potentiel de la pénétration solaire à travers les fenêtres dans un climat chaud et son effet sur l'augmentation de la température intérieure dépend d'une façon considérable de l'orientation des fenêtres. De son côté (Mazria Edouard, 1980) affirme que les fenêtres sont des sources du déficit thermique important, et que l'exposition optimale pour le captage solaire est le plein sud. Mais des variations vers l'Est et l'Ouest qui ne dépasse pas 30°.

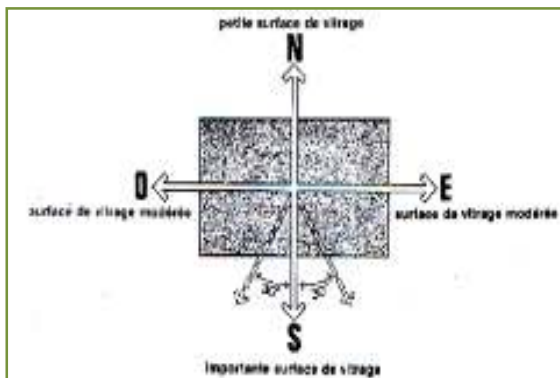


Figure II.30 : Exposition optimale pour le captage de soleil. [MAZRIA, 1980]

(Bellara Samira, 2005) déclare que lorsque l'occultation n'est pas efficace le rayonnement solaire pénètre directement par la fenêtre et chauffe l'intérieur. Les températures sont alors très influencées par l'orientation des fenêtres.

L'effet de l'orientation des fenêtres sur les températures intérieures est largement conditionné par la ventilation naturelle et le degré des protections solaires.⁹ (B.GIVONI, 1978) évalue l'influence de l'orientation des ouvertures sur les températures intérieures selon différents cas de disponibilité d'occultation et ventilation. Les résultats sont résumés ci-après.

▪ **Cas 01 : bâtiments non ventilés et pourvus d'occultations efficaces des ouvertures :**

Les températures intérieures sont pratiquement indépendantes de l'orientation.

⁹ Labreche Samia.(2014) «Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides ».

- **Cas 02 : absence ou inefficacité de l'occultation et présence de la ventilation :** De petites variations dans les températures ambiantes selon l'orientation des ouvertures, mais évidemment, les surfaces internes exposées au rayonnement qui pénètre sont échauffées.
- **Cas 03 : aucune occultation et aucune possibilité de ventilation :** les Différences dans l'échauffement solaire dues à l'orientation sont maximales et les régimes de températures ainsi que leurs niveaux connaissent de larges variations.
- **Cas 04 : conditions intermédiaires de ventilation et d'occultation :**

L'influence de l'orientation des ouvertures est certaine, mais à un degré moindre.

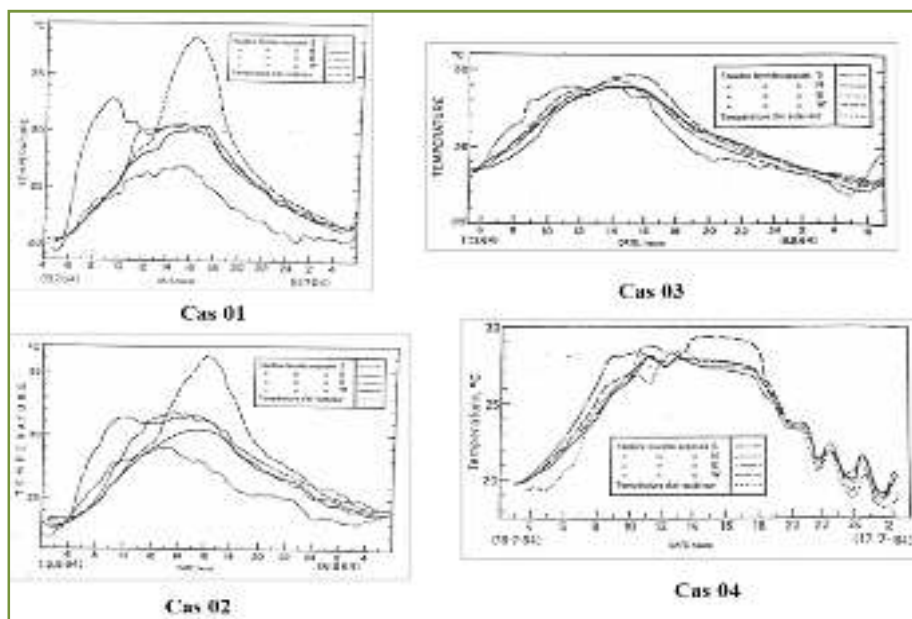


Figure II.31 : Influence de l'orientation des ouvertures sur les températures intérieures selon différents cas de disponibilité d'occultation et ventilation [Givoni, 1978]

Les Matériau de fenêtres, l'orientation et son rapport de surface au mur sont les principaux facteurs affectent la performance du système vitré, comme indiqué par (Fatima.M Elaiab,2014). De son coté Al-Tamimi et al ont rapporté une étude en (2011) qui a étudié l'effet de l'orientation, les différentes valeurs de WWR et l'effet de la ventilation naturelle sur la performance thermique pour des chambres résidentielles dans la région tropicale. Deux chambres ont été choisies pour l'étude, une orientée vers l'est et l'autre orientée vers l'ouest. Les résultats ont montré que :

- Les fenêtres orientées à l'Est ont un effet plus évident sur l'augmentation de la température de l'air intérieur que les fenêtres orientées à l'Ouest, et cela s'applique aux chambres ventilées ou non ventilées.
- Les chambres orientées à l'Est sont toujours plus chaudes à celles de l'Ouest. Et même en appliquant la ventilation naturelle, changer le rapport WWR ou non, la différence de la moyenne de la température de l'air intérieur et extérieur des chambres orientées à l'Est est plus élevée, par rapport aux chambres orientées à l'Ouest.
- Une sélection appropriée pour l'orientation des fenêtres, la taille optimale du verre et l'application d'un système de ventilation naturelle peuvent réduire l'effet négatif du rayonnement solaire sur l'augmentation de la température de l'air intérieur.

Une autre étude réalisée par (M. A. Hamdan, 1994) évalue l'effet de la brise soleil en tant que dispositif d'ombrage sur le gain thermique à travers des fenêtres à différentes orientations à Amman. Les résultats ont montré que :

- Afin de minimiser le gain thermique à travers les fenêtres sans protection solaire pendant l'été, il est conseillé de construire des fenêtres orientées vers le Nord et l'Ouest.

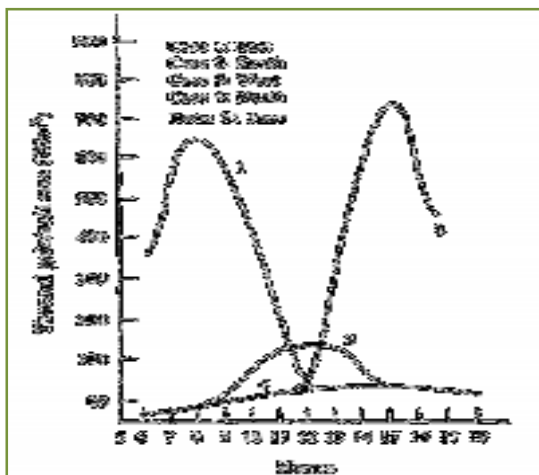


Figure II.32 : Le gain thermique à travers des fenêtres sans protection solaire à différentes orientations pendant l'été. [M. A. Hamdan ,1994]

- une brise soleil, en tant que dispositif d'ombrage, a une efficacité maximale pour réduire le rayonnement solaire direct pendant l'été lorsqu'elle est installée sur une fenêtre orientée vers le sud-est à Amman. Avec une réduction horaire maximale du gain thermique de 65% en été. Cependant, ce dispositif d'ombrage réduit, jusqu'à 45%, le gain solaire direct par la fenêtre en hiver qui est utilisé pour le chauffage passif.

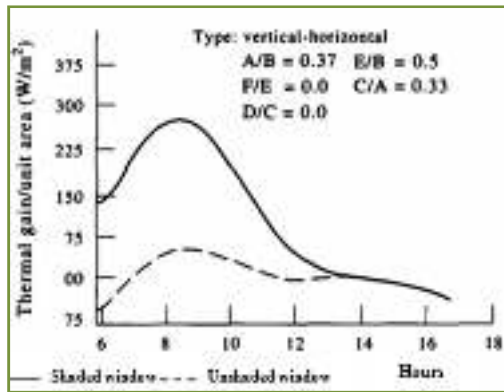


Figure II.33 : Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le sud-est (21 juin). [M. A. Hamdan ,1994]

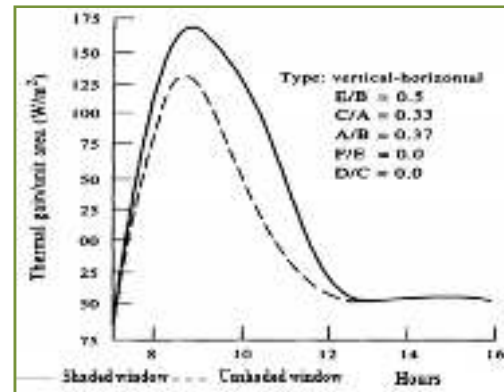


Figure II.34: Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le sud-est (21 déc). [M. A. Hamdan ,1994]

- La réduction du gain thermique pendant l'hiver est maximale lorsqu'une fenêtre orientée vers l'est est protégée par une brise soleil. Avec une valeur de réduction horaire maximale en gain thermique de 40% en été et de 80% en hiver.

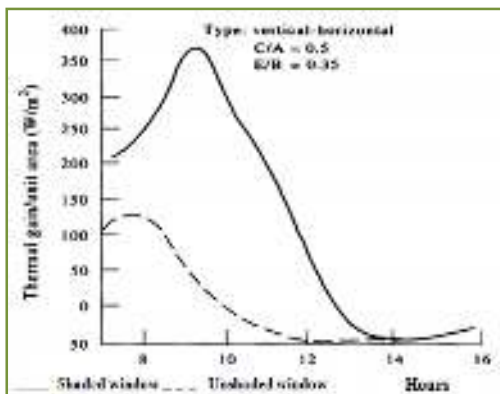


Figure II.35 : Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le l'est (21 déc). [M. A. Hamdan ,1994]

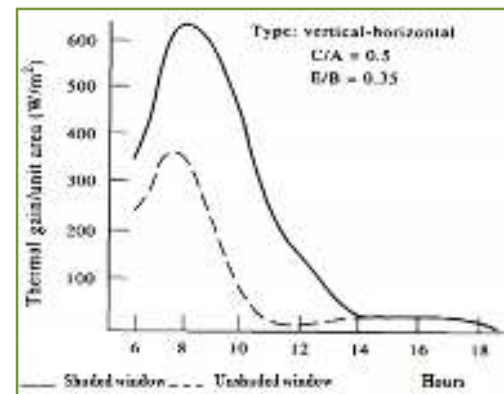


Figure II.36 : Le gain thermique à travers les fenêtres orientées vers le l'est (21 juin). [M. A. Hamdan ,1994]

b. Effet de la forme des fenêtres

Pour une même surface vitrée, la forme d'une ouverture influence sur la quantité d'énergie solaire arrivant dans un espace intérieur. La forme de la répartition de l'énergie solaire se diffère avec la forme de l'ouverture, une ouverture de forme ronde ou de forme rectangulaire donnant deux exemples différents de répartition. (Labreche Samia,2014)

c. Effet de la position des fenêtres

(Tiberiu Catalina,2009) affirme que « Les baies vitrées et leur distribution sur l'enveloppe sont aussi des paramètres essentiels lors de la conception d'un bâtiment ». La perte et le gain de chaleur à travers une fenêtre ne dépendent pas seulement du type de fenêtre et de ses propriétés seules mais aussi de la taille et de la position de la fenêtre, comme indiqué par (C.Koranteng,2015).

L'emplacement de l'ouverture dans l'enveloppe du bâtiment exerce une grande influence sur la pénétration de la lumière solaire et sur les gains thermiques dans les espaces intérieurs :

- Les ouvertures situées sur les parois horizontales (fenêtres de toit, coupoles, etc.) captent plus d'énergie solaire pendant la période chaude ce qui cause le problème de surchauffe ; par contre, pendant la période froide, elles subissent de grandes pertes thermiques ;
- Les ouvertures situées sur les parois verticales permettent une pénétration différente du rayonnement solaire à l'intérieur d'un espace selon leurs diverses positions (haute, moyenne ou basse). (Labreche Samia,2014)

d. Effet du type et des caractéristiques thermiques du vitrage

La conception des fenêtres, en particulier les vitrages, est un facteur essentiel pour déterminer l'efficacité de la conception solaire passive (Samar Jaber ,2011).Les surfaces vitrées participent activement dans les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. Le verre permet au rayonnement solaire de pénétrer à l'intérieur ou il est absorbé par les surfaces et les objets que contient le bâtiment.(Saddok Amel,2016)

La nature du vitrage influence fortement les performances thermiques. Celles-ci sont évaluées au moyen du coefficient de déperdition surfacique K, exprimé en $W/m^2\text{°C}$, qui doit être le plus bas possible.¹⁰

¹⁰ Patrick Leroux.(2008) «Guide de l'écoconstruction ,P13».

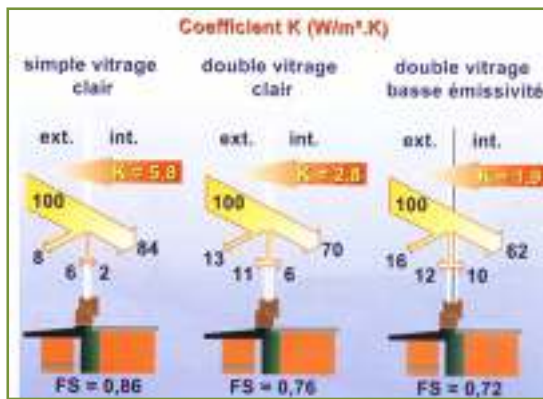


Figure II.37 : Performance thermique et type de vitrage [A.Liebard et A.De Herde, 1996]

(B.GIVONI, 1978) affirme qu'une surface vitrée exposée au soleil provoque une élévation de températures intérieures supérieures à celles que pourra provoquer la pénétration du rayonnement solaire par une fenêtre ouverte.

Dans la perspective d'amélioration du confort d'été, il est possible de changer le type de vitrage notamment en prenant soin de choisir un faible facteur solaire afin de diminuer les gains solaires qui peuvent provoquer des surchauffes.¹¹ Ce coefficient de transmission d'énergie ou facteur solaire a une influence considérable sur les gains solaires. Plus il sera élevé, plus les gains solaires seront élevés. (JM Hauglustaine et al.,2001)

(J.L.Izard, 1993) suggère que le vitrage idéal serait celui qui présenterait un facteur de transmission énergétique en allant en diminuant, lorsque l'énergie solaire incidente augmente.

Dans une étude réalisée sur la tour administrative de l'USTO, L'emploi du verre teinté avec son coefficient thermique (U) médiocre (5,8 W/m²K) et son facteur solaire (FS) plus ou moins élevé (61 %) ; laisse passer les rayons solaires sans pour autant les atténuer en été.¹²

L'utilisation du verre à basse émissivité, le verre réfléchissant et les façades à double peau ont montré leurs efficacités dans l'isolation contre les effets extrêmes du climat.(Bouchahm guermia et Bourebia fatiha,2010).

e. Influence de la dimension de la fenêtre

La taille des fenêtres est un élément déterminant dans la conception architecturale du système de fenestration d'un bâtiment. Des fenêtres de grande taille auront un impact majeur sur le bilan thermique des bâtiments en laissant la chaleur entrer en période estivale mais cela

¹¹ N. Fezziouiet al., Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien, 2008.

¹² Le verre et le confort thermique dans les édifices administratifs moderne. Cas d'Oran – Algérie

peut provoquer des problèmes de surchauffe importants, et sortir en période hivernale ce qui peut entraîner d'importantes déperditions thermiques.

La sélection de la taille de la fenêtre est l'un des problèmes importants pour un système de fenêtres, non seulement pour des raisons de conception, mais aussi en ce qui concerne la performance énergétique.¹³ Pendant la saison chaude, la fenêtre préserve de la surchauffe, donc un intérêt particulier doit être porté à ses dimensions et son système de protection, comme indiqué par (N. Safer, 2006).

(IZARD. J.L, 1993) affirme que l'augmentation de la surface vitrée a toujours pour effet une augmentation de la température interne diurne.

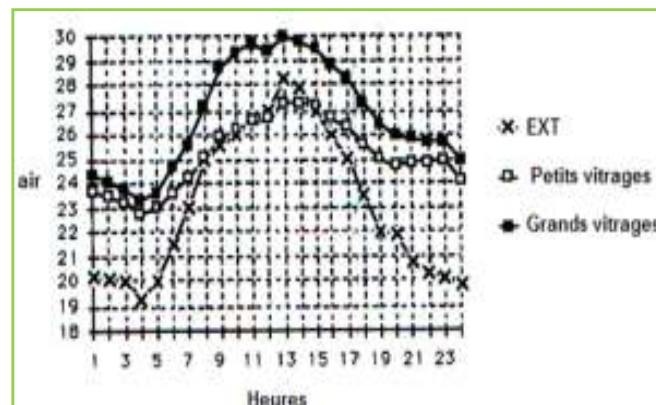


Figure II.38 : Effet de la dimension du vitrage sur les températures interne. [IZARD. J.L, 1993]

Une étude réalisée par (N. Fezziouiet al., 2008) évalue l'influence de l'enveloppe du bâtiment pour obtenir un niveau de confort thermique avec une consommation énergétique réduite en période de surchauffe (de Mai à Septembre) au sud Algérien. Cette étude quantitative est basée sur la simulation numérique du bâtiment à l'aide du logiciel TRNSYS. La Surface des fenêtres est l'un des paramètres étudiés, Dans ce cas, trois différents types de surface ont été sélectionnés (N1 : S = 1,2 m², N2 : S = 1,5 m², N3 : S = 2 m²). Les résultats indiquent que :

¹³ , J.W. Lee et al, Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements, 2013.

- Le paramètre considéré n'a aucune influence sur l'abaissement de températures intérieures.
- L'augmentation des surfaces des fenêtres s'avère une solution non souhaitable pour le cas considéré,
- L'effet de la protection des fenêtres est plus important que celui des dimensions.

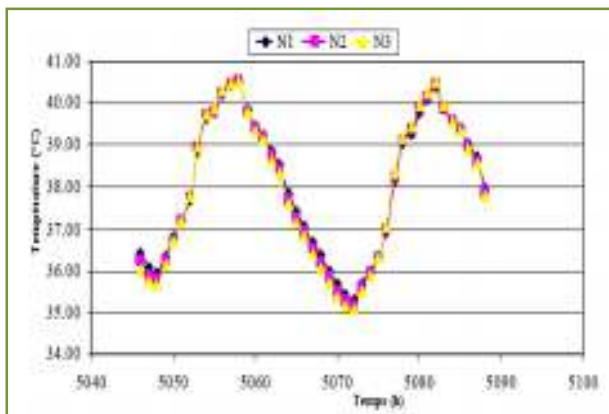


Figure II.39 : Effet de surface de fenêtre sur la température intérieure du local. [N. Fezziouiet al . , 2008]

Une autre étude réalisée par (Khaled a. al-sallal ,1998) vise à déterminer la taille des fenêtres pour obtenir le refroidissement passif, le chauffage passif et la lumière du jour dans les régions chaudes et arides. L'étude a conclu que, Bien qu'en augmentant la surface de la fenêtre du sud on peut fournir plus d'économies auxiliaire de chaleur, mais qui aura un impact négatif pendant l'été, en augmentant le gain de chaleur. Al-Sallal ajoute aussi que, «Pour dimensionner les fenêtres pendant le processus de conception dans un climat comme Fresno, en Californie, on devrait commencer par les problèmes de refroidissement passifs avant le chauffage passif».

Une étude récente menée par (Halil Alibaba , 2016) vise à déterminer le WWR optimale pour les bureaux dans un climat chaud et humide. Des simulations thermiques dynamiques avec le logiciel EDSL Tas, un vote moyen prévisible (PMV) et un pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) ont été utilisés pour la sensation thermique, afin d'optimiser le meilleur rapport WWR dans un climat chaud et humide qui existe dans le cas d' étude de Famagusta (Chypre). Les résultats ont montré que :

- En mai, 45% (PPD <6% -0,7% fenêtre ouverte), 93% (PPD <10-0,2 fenêtre ouverte) et 97% (PPD <15% -0,1% fenêtre ouverte) sont obtenus lorsque le rapport de la fenêtre au mur externe (WWR) est de 10%.

- Le confort thermique est obtenu lorsque le rapport de la fenêtre au mur externe (WWR) est de 10%.
- une augmentation du rapport d'ouverture de la fenêtre affecte positivement le confort thermique.

(Persson et al.,2006) ont rapporté une étude en 2006 qui a étudié l'influence de la taille de la fenêtre sur le bilan énergétique des maisons à faible énergie. Différentes orientations ont été étudiées ainsi que l'influence du type de fenêtre. Les résultats montrent que la taille des fenêtres n'a pas une influence majeure sur la demande de chauffage en hiver, par contre elle a un impact direct sur le besoin de refroidissement en été. Ils ajoutent aussi que, « Pour diminuer le risque de températures excessives ou d'énergie nécessaire au refroidissement, il existe une taille de fenêtre optimale orientée vers le sud qui est plus petite que la taille originale des bâtiments étudiés ».

f. Influence du dispositif d'occultation

Pour améliorer l'efficacité des fenêtres, il est important d'associer un système de protection convenable (Bellara Samira,2005). Les protections solaires, selon leur conception et leurs dimensions, exercent une influence sur les gains solaires du fait qu'elles laissent ou empêchent pénétrer les rayons solaires selon les saisons (Labreche Samia,2014) .

Le rayonnement solaire en été est une des principales causes de surchauffe. Il peut être évité par diverses mesures de protection solaire. Le type de dispositif dépend surtout de l'orientation des ouvertures. Les fenêtres orientées au sud sont les plus faciles à protéger du soleil d'été qui est haut dans le ciel. Les puits de lumière et les surfaces vitrées situées sur des toits-terrasses ou des toitures en pente nécessitent une grande attention. L'orientation à l'est ou à l'ouest pose aussi des problèmes en raison du rayonnement solaire perpendiculaire par rapport aux fenêtres aux premières et dernières heures de la journée. (Roberto gonzalo et karl j. habermann,2008).

L'occultation du vitrage affecte la quantité du rayonnement incident et modifie le flux de chaleur pénétrant à l'intérieur et les températures intérieures. Et qui dépend de la position de l'occultation par rapport au vitrage (extérieure ou intérieure). (B.Givoni,1978) affirme que le rayonnement solaire pénétrant par les fenêtres dépend des types d'occultation utilisés et dans une moindre mesure, de la composition du vitrage. Avec des protections extérieures de couleur sombre, moins de 10% du rayonnement incident parvient à pénétrer dans le bâtiment.

En utilisant des protections intérieures, la proportion monte de 40 à 70% et sans protection, elle atteint 90 % ». De son côté (C. Bougriou et al, 2000) souligne que les protections solaires extérieures sont plus efficaces que les protections intérieure. Parce qu'elles réfléchissent le flux de chaleur rayonné avant qu'il traverse et pénètre dans le local. D'autre part le flux absorbé par la protection est presque entièrement dissipé par convection et par rayonnement vers l'environnement extérieur. Cela n'est pas le cas pour les stores intérieurs.

Une étude menée par (E.Shaviv et I.G.Capeluto,1992) vise à évaluer l'importance relative de quelques paramètres constructifs dans le climat chaud humide, et illustrer le besoin pour la conception prudente de l'occultation de la fenêtre les jours d'été. Les résultats obtenues à partir de cette étude ont montré que : la fenêtre occultée est « le premier paramètre de conception géométrique que l'architecte devrait consacrer plus d'attention pendant le processus de la décision ».

(N. Safer, 2006) affirme que pendant la saison chaude, la fenêtre préserve de la surchauffe, donc un intérêt particulier doit être porté à ses dimensions et son système de protection. De sa part, (N. Fezzioui et al., 2008) déclare que l'effet de la protection des fenêtres est plus important que celui des dimensions.

II.10.2-La fenêtre et le confort respiratoire

II.10.2.1-Définition de la notion de confort respiratoire

Le confort respiratoire est un facteur d'ambiance directement lié à la thermique de l'espace, la purification de l'air implique son renouvellement par un processus de ventilation naturelle ou mécanique pour obtenir une qualité d'air escomptée. Cette qualité de l'air est importante pour les processus métaboliques et pour l'hygiène de chacun. Elle doit préserver l'individu des risques de contamination et de pollution dus aux diverses substances en présence : germes pathogènes, molécules organiques, matières odorantes, gaz carbonique, poussières, fumées de tabac et particules radioactives. Portant dans la consommation énergétique d'un bâtiment.¹⁴

¹⁴ A.M.E (Agence Méditerranéenne de l'environnement et ordre des architectes du Languedoc Roussillon). (2002) «Qualité environnementale des bâtiments en Languedoc Roussillon. Montpellier : La charité».

II.10.2.2-Qualité de l'air intérieur

Le bien-être des individus à l'intérieur des bâtiments suscite un intérêt croissant ; le confort respiratoire dépend de la qualité de l'air intérieur des bâtiments. Elle est cruciale pour la santé, le confort et la performance des occupants. De nombreux facteurs peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'air intérieur.

▪ Des pollutions qui viennent de l'intérieur :

- ✓ Composés organiques volatiles (COV) émis par les bâtiments (peintures, colles, textiles...) et les activités (produits de nettoyage, bricolages, marqueurs...).
- ✓ Particules fines, en particulier celles liées à l'utilisation de la craie sur le tableau.
- ✓ CO₂, émis par la respiration des occupants. Le CO₂ n'est pas un polluant, mais pose problème en forte concentration. La respiration des enfants n'entraîne pas une production de CO₂ plus faible que celle des adultes.
- ✓ Odeurs émises par les occupants et par les activités.
- ✓ Humidité liée à l'occupation (émission par les occupants, activités, cuisines, ...) et à des problèmes de conception (condensation), qui peut être source de développement de moisissures de prolifération de bactéries.

▪ Des pollutions qui viennent de l'extérieur :

- ✓ Pollutions industrielles, gaz d'échappement...
- ✓ Humidité liée à la pénétration d'eau dans le bâtiment (infiltrations, humidité ascensionnelle...) qui peut être source de développement de moisissures de prolifération de bactéries.
- ✓ Émission de radon, dans certaines régions, dépendant de la nature du sol.¹⁵

¹⁵ <https://www.renovermonecole.be/fr/objectifs-bien-etre/confort-respiratoire>.

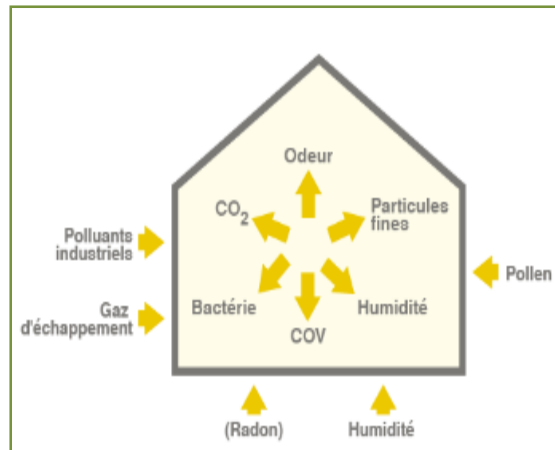


Figure II.40 : Les polluants extérieurs et intérieurs.

[La ventilation et l'énergie (guide pratique pour architectes)
www.renovermonecole.be]

II.10.2.3- Le renouvellement d'air

Pour assurer le confort respiratoire au sein du bâtiment, la qualité de l'air que l'on respire à l'intérieur est très importante pour garantir la santé et l'hygiène des individus. Une mauvaise qualité de l'air intérieur peut provoquer de simple gêne (odeurs désagréables, fatigue, maux de tête, irritation des yeux et des muqueuses, irritation de la peau... etc) , ainsi que des symptômes aigus sur la santé (développement des pathologies, des infections et des allergies respiratoires...etc).

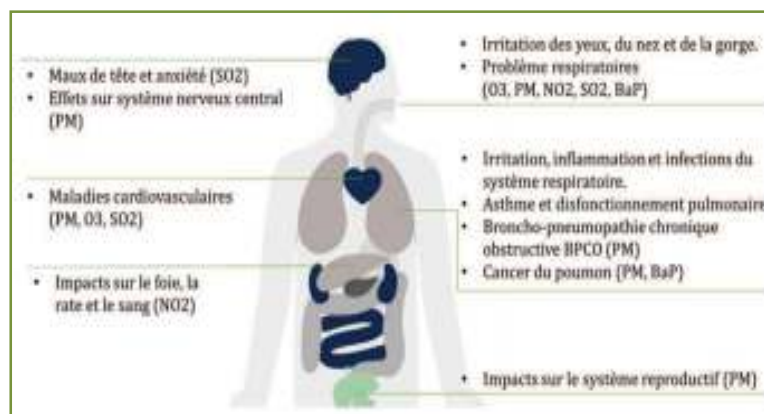


Figure II.41: Impacts sanitaires de la pollution de l'air. [EEA, 2013]

La qualité de l'air est déterminante, au même titre que la température ou l'humidité, pour un climat intérieur confortable. Alors que la plupart des individus passent la majeure partie de leur temps à l'intérieur de bâtiments, une pollution intérieure est plus facilement acceptée qu'une pollution à l'extérieur. A cet égard, l'aptitude physiologique du corps à s'accommoder

jusqu'à un certain point aux substances polluantes présentes dans l'air ne doit pas faire illusion : certaines situations restent nocives, même si elles supportables. Le maintien de la qualité de l'air passe par le contrôle de son renouvellement.¹⁴

Un renouvellement d'air correct est particulièrement indispensable pour les raisons suivantes :

- Renouvellement de l'oxygène pour satisfaire les besoins des occupants,
- Réguler les taux d'humidité (évitant ainsi la formation de moisissures),
- Limiter la pollution intérieure (CO₂ et autres polluants intérieurs),
- Améliorer le confort en éliminant les odeurs et les toxines présentes dans l'environnement intérieur,
- Apport d'air frais, donc économie de coûts de refroidissement,
- Climat ambiant sain pour le bâtiment.

II.10.2.4-La ventilation hygiénique

La pureté de l'air à l'intérieur des bâtiments est un acteur primordial dans la sensation de confort ressentie par l'occupant. Elle est assurée par son renouvellement soit naturellement par les ouvertures d'amenée d'air frais et d'évacuation d'air vicié, soit mécaniquement par des bouches de pulsion et d'extraction.

La ventilation hygiénique est essentielle et permet de diluer les divers polluants émis à l'intérieur du bâtiment et d'en évacuer le CO₂ et l'humidité dus à l'occupation des locaux afin de maintenir une bonne qualité d'air à l'intérieur. Les fenêtres peuvent être considérées comme l'un des principaux éléments du système de ventilation hygiénique.

La ventilation naturelle par ouverture des fenêtres permet de réduire les infiltrations d'air par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe et donne aux occupants la possibilité de contrôler les ouvertures des fenêtres et des entrées d'air en façade. En période estivale, le renouvellement d'air peut être insuffisant, entraînant des températures élevées et une qualité d'air médiocre à l'intérieur.

L'efficacité de ce type de système de ventilation naturelle repose entièrement sur l'action des occupants, du niveau de pollution ou de confinement. (Juslin Kof,2009)

a. La ventilation naturelle

La ventilation est une exigence fondamentale pour la santé des occupants et la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments.¹⁶ La ventilation naturelle est une technique importante de refroidissement passif. En général, la ventilation des environnements intérieurs est également nécessaire pour maintenir les niveaux requis de qualité de l'air dans un espace.(Madi Kaboré,2015)

La ventilation naturelle fournit la quantité nécessaire d'air grâce à un processus naturel qui permet à l'air d'entrer et de sortir des bâtiments par les fenêtres, tout en empêchant ainsi la contamination intérieure et créant un confort thermique pour les occupants.¹⁷ Elle est assurée par les forces motrices naturelles, le vent et le tirage thermique. L'amenée et l'évacuation de l'air s'effectuent naturellement.¹⁸ Ces deux forces motrices sont variables dans le temps et l'espace ce qui rend difficile le contrôle des débits.(Adrien Dhalluin,2013)

▪ L'effet du vent

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur induit la différence de la densité de l'air et par conséquent son mouvement. Durant la période froide ($T_{ext} < T_{int}$), l'air chaud à l'intérieur se déplace vers le plafond pour sortir par les ouvertures dans la partie haute du bâtiment. Ce déplacement crée une dépression dans la partie basse qui induit l'introduction de l'air froid de l'extérieur par les ouvertures de la partie basse. Durant la période chaude, le phénomène est inversé mais il reste négligeable car la différence de température est moins importante.¹⁸

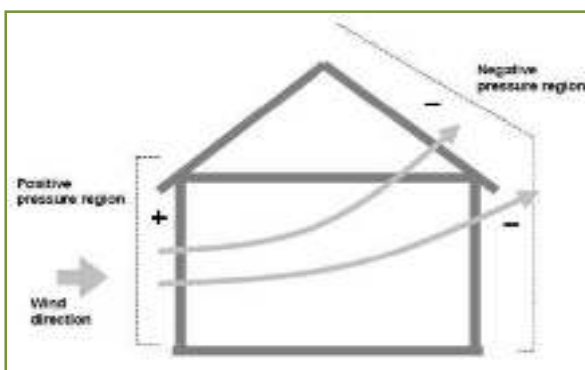


Figure II.42 : L'effet du vent sur le bâtiment.

[Russel , 2005]

¹⁶ Zahra Ghiabaklou. (2010) «Natural Ventilation as a Design Strategy for Energy Saving».

¹⁷ Anunobi, A.I et al. (2015) « Assessment of Window Types in Natural Ventilation of Hotels in Taraba State».

¹⁸ Mireille Rahmeh.(2015) «Etude expérimentale et numérique des performances de la ventilation mécanique par insufflation : qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels».

Le vent, selon sa vitesse et sa direction, applique une pression sur les façades et la toiture du bâtiment engendrant par conséquent des flux d'air infiltrant ou exfiltrant l'enveloppe extérieure et les ouvertures.¹⁸

▪ Le tirage thermique

Les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment engendrent des différences de densité de l'air et donc de gradient de pression dans ces deux zones, à l'origine de la circulation d'air. Ainsi, lorsque l'air intérieur est plus chaud que l'air extérieur, ce dernier va entrer par les ouvertures de la partie basse du bâtiment et ressortir par les ouvertures de la partie haute (Figure II.43). Il apparaît alors une zone plane le long de laquelle la différence de pression est nulle, on parle de plan neutre.¹⁹

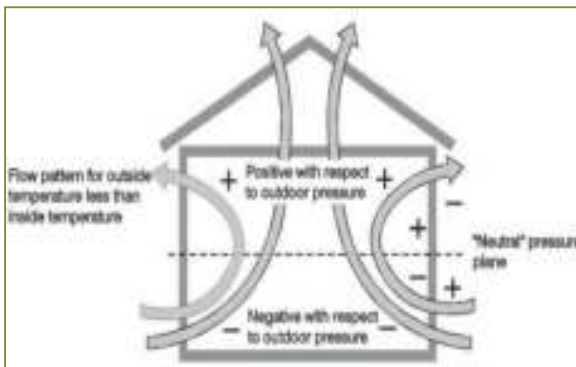


Figure II.43 : Effet du tirage thermique.

[Concannon, 2002]

▪ Couplage des deux forces motrices

En réalité les deux moteurs de la ventilation naturelle agissent simultanément (Figure II.44). Ils peuvent agir soit de manière combinée, ce qui permet d'accroître les débits de ventilation, soit en opposition réduisant les débits d'aération. L'action du vent peut toutefois avoir des effets relativement plus importants que ceux du tirage thermique, notamment pour les bâtiments de faible hauteur (Juslin Kof, 2009). Ainsi, à partir d'une vitesse de 3 m/s, le vent devient dominant sur les autres forces des systèmes de ventilation naturelle (P.Concannon, 2002).

¹⁹ Adrien Dhalluin. (2013) «Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire».

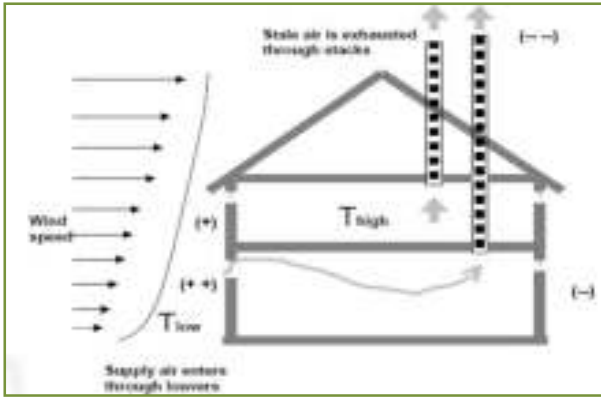


Figure II.44: Effets combinés du vent et du tirage thermique. [Russel, 2005]

La ventilation naturelle peut être définie comme étant « mono-façade », lorsque toutes les ouvertures sont disposées d’un seul côté de l’espace ventilé, ou « traversante », lorsqu’elles sont disposées sur des façades opposés.¹⁹

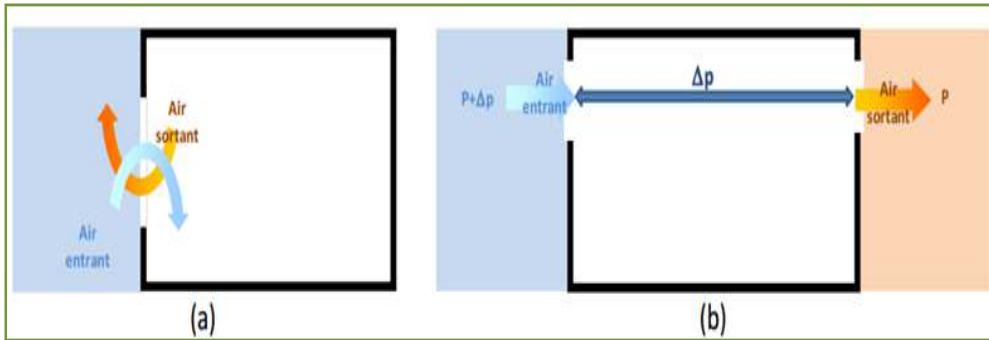


Figure II.45: Schématisation de la ventilation (a) mono-façade et (b) traversante.

[Marcello Caciolo, 2010]

▪ **Ventilation naturelle « mono-façade »**

La ventilation mono-façade est caractérisée par une même ouverture servant à la fois d’entrée et de sortie d’air (Figure II.46). Le sens des flux d’air est moins prévisible et les différences de pression liées aux forces motrices sont généralement réduites, du fait de la proximité des zones d’entrée et de sortie d’air. Les débits de ventilation et l’efficacité de la ventilation en termes d’évacuation des polluants sont alors souvent plus faibles que la ventilation traversante. (K.Limam et al., 1997)

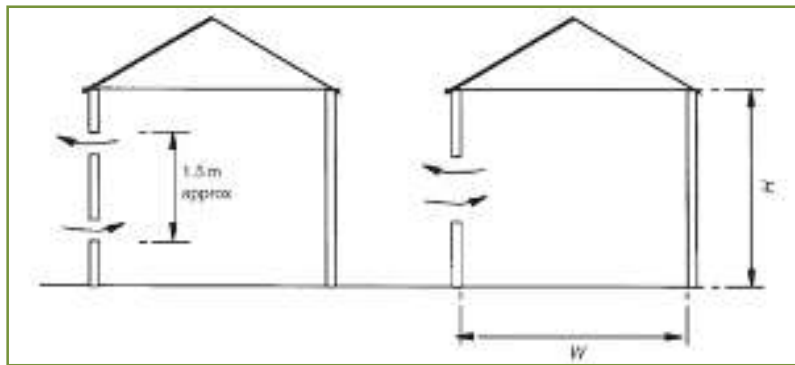


Figure II.46: Principe de la ventilation mono-façade ($W_{\max} \sim 2.5H$ pour être efficace).

[Awbi, 2003]

De plus, en hiver les occupants ont tendance à laisser fermer les fenêtres, ce qui nuit à la QAI, et en cas d'ouverture, les débits de ventilation sont souvent trop importants par rapport à ce qui est nécessaire (vent et fort tirage thermique), ce qui augmente les pénalités énergétiques et accroît le risque de courant d'air froid. En été, les débits de ventilation peuvent être très faibles, pouvant entraîner des surchauffes et une QAI médiocre. (Adrien Dhalluin, 2013)

- **Ventilation naturelle « traversante »**

Le concept de cette stratégie de ventilation repose sur l'existence d'une circulation d'air entre deux ouvertures opposées, causée par une différence de pression liée aux effets du vent et du tirage thermique (Figure II.47). L'air entre par les ouvertures du côté en surpression et sort par les ouvertures du côté en dépression. (Adrien Dhalluin, 2013)

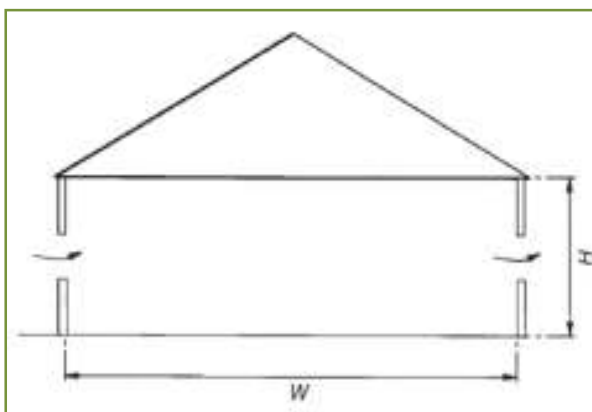


Figure II.47: Principe de la ventilation traversante

($W_{\max} \sim 5H$ pour être efficace). [Awbi, 2003]

Typiquement, un bâtiment utilisant cette stratégie de ventilation nécessite d'être conçu de façon particulière, afin de profiter au mieux de l'effet du vent et l'effet thermique. Les configurations les plus courantes font usage d'une « cheminée thermique » (Figure II.48 a), d'un atrium (Figure II.48 b), ou d'une façade double peau (Figure II.48 c), avec des ouvertures au sommet, afin de profiter de l'effet cheminée. (Marcello Caciolo,2010)

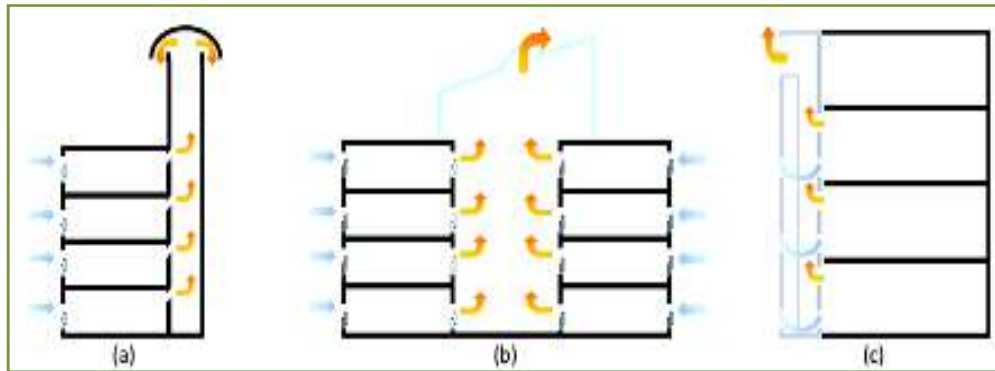


Figure II.48: Exemple de solutions architecturales favorisant la ventilation traversante.

(a) cheminée, (b) atrium, (c) double peau [Marcello Caciolo,2010]

D'après (E.Gratia, 2004), un renouvellement d'air exécuté par une ventilation naturelle doit répondre aux exigences suivantes :

- Le taux de renouvellement d'air doit être suffisant pour fournir suffisamment d'air neuf afin d'assurer la santé et le confort des occupants. Ceci est généralement le critère de dimensionnement retenu pour l'hiver ;
- Pendant l'été, le taux de renouvellement d'air doit être suffisant pour permettre l'évacuation des gains de chaleur internes et maintenir des conditions de confort acceptables. Les taux de ventilation d'été doivent en général être d'un ordre de grandeur supérieur à ceux nécessaires en hiver,
- Le débit d'air doit être distribué uniformément dans la zone d'occupation afin d'éviter les zones de sous ou sur rafraîchissement et assurer partout une bonne qualité d'air,
- En ventilation naturelle, les pressions motrices sont très faibles, typiquement inférieures à 10 pascals, aussi un dimensionnement très soigneux est-il nécessaire pour s'assurer que la circulation de l'air s'effectue bien comme prévu. Le trajet doit être aussi direct que possible car les forces disponibles ne peuvent pas en général surmonter des résistances présentées par des changements de direction.

Tableau II. 1 : Normes et recommandation portant sur la détermination du renouvellement d'air. [ASHRAE, 2004]

Destination des locaux	Débit minimal d'air neuf en mètres cubes/heure et par occupant (air à 1,2 kg/m ³)	
	Locaux avec interdiction de fumer	Locaux sans interdiction de fumer
Locaux d'enseignement: Classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique) : Maternelles, primaires et secondaires du 1 ^{er} cycle Secondaires du 2e cycle et universitaires Ateliers	15 18 18	25 25
Locaux d'hébergement: Chambres collectives (plus de 3 personnes) (*), dortoirs, cellules, salles de repos.	18	25
Bureaux et locaux assimilés: Tels que locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques.	18	25
Locaux de réunions: tels que salles de réunions, de spectacles, de culte, clubs, foyers.	18	30
Locaux de vente: Tels que boutiques, supermarchés	22	30
Locaux de restauration: Cafés, bar, restaurants, cantines, salles à manger	22	30
Locaux à usage sportif: Par sportif : dans une piscine dans les autres locaux Par spectateur :	22 25 18	30 30
(*) Pour les chambres de moins de trois personnes, le débit minimal à prévoir est de 30 mètres cubes/heure par local.		

b. Débit de ventilation

Le débit d'une ventilation (m³/h) dépend des facteurs suivants (E.Gratia, 2004) :

- La perméabilité de l'ouverture en position fermée, qui est en fonction de la dimension de la baie et du type d'ouvrant ;
- La section de l'ouverture en position ouverte ;
- Le gradient de pression entre les deux faces de l'ouverture considérée ;
- Au gradient de température d'air entre les entrées et sorties d'air,(ce gradient peut être créé par une différence de niveau entre les entrées et sorties d'air ou par des apports de chaleur localisés) ;
- A la vitesse d'air extérieur.

Le volume d'air échangé par ventilation à travers une fenêtre où une porte ouverte selon (Camill Allocca ,2001), (A. Abwi ,1998) ,(Van der Maas J. Roulet ,1996):

$$V_{air} = 1/3 \cdot C_d \cdot A \sqrt{g \cdot h \cdot \Delta T / T_{a0}} \quad \dots\dots\dots \text{Eq II-3}$$

Où :

A : La surface de l'ouverture en m².

C_d : Coefficient de décharge de l' ouverture (réduction de la vitesse de l'air à l'entrée, Cd égal à 0.6)

h : La hauteur de l'ouverture en m.

ΔT : La différence de température entre l'extérieur et l'intérieur en K.

T_{ao} : La température extérieur en K.

g : L'accélération de pesanteur en m/s.

Un autre modèle empirique permettant l'évaluation des débits de renouvellement d'air a été proposé par (De Gidds and Phaff ,1982)

$$V_{eff} = (c_1 v_r^2 + c_2 H \cdot \Delta T + c_3)^{1/2} \quad \dots\dots\dots \text{Eq II-4}$$

Où :

V_{eff}: La vitesse moyenne à travers une moitié de l'ouverture en m/s.

c₁ : Un coefficient adimensionnel fonction du type d'ouvrant (c1 ≈ 0.001).

c_2 et c_3 : Sont des coefficients affectant le tirage thermique et l'effet du vent ($c_2 \approx 0.0035$, $c_3 = 0.01$).

v_r : La vitesse moyenne du vent en m/s.

H : La hauteur de l'ouvrant en m.

ΔT : L'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur en K.

Le débit volumique d'air à travers l'ouvrant est :

$$Q = 0,5.A_w.V_{eff} \dots\dots\dots \text{Eq II-5}$$

Où :

V_{eff} : La vitesse moyenne à travers une moitié de l'ouverture.

A_w : L'aire effective de l'ouvrant en m^2 .

Le débit de renouvellement d'air à travers la fenêtre est de: $Q = 0,5.A_w.V_{eff}$

Le taux de renouvellement d'air ACH est alors de :

$$ACH = Q/V .3600 \dots\dots\dots \text{Eq II-6}$$

v : Le volume de la pièce en m^3

II.10.2.5-Effet de la conception des fenêtres sur la ventilation naturelle

L'effet de diverses configurations de fenêtres et de facteurs architecturaux sur le mouvement de l'air à l'intérieur du bâtiment, y compris l'orientation du vent, la ventilation transversale, le rapport de surface entrée/sortie, la forme d'entrée, l'emplacement de la fenêtre et les accessoires de fenêtre, a été rapporté dans une étude expérimentale par (H. J. Sobin, 1980)

(Zahra Ghiabaklou ,2010) affirme que l'effet de l'orientation vers le vent sur la ventilation varie selon les caractéristiques physiques de la configuration de la fenêtre utilisée, et en particulier les caractéristiques de l'emplacement de la fenêtre, de la forme, de la taille et de l'accessoire de fenêtre.

a. Influence de l'orientation des fenêtres par rapport au vent sur la ventilation

L'orientation des fenêtres vis-à-vis de la direction des vents a une influence considérable sur la ventilation intérieure. (Izard J.L, 1979) signale que les orientations sont choisies à partir de l'utilisation que l'on désire. Ainsi, les parois exposées aux vents porteurs de pluie, de sable ou autre doivent être spécialement protégées, alors que celles exposées aux vents doux peuvent être ouvertes.

(S.Abdou, 2004) déclare que dans nos climats sec et chaud, Les ouvertures sont souvent orientées vers les directions des vents frais (brise) afin de permettre la ventilation durant les soirées.

(B. Givoni ,1978) a donné quelques recommandations afin d'assurer une ventilation satisfaisante et adéquate. Le principe est de prévoir des ouvertures aussi bien sur la façade « au vent » du bâtiment que sur la façade « sous le vent » :

- Si la façade comporte une ou deux ouvertures situées sur la façade sous le vent du bâtiment, la vitesse moyenne de l'air intérieur est très faible ;
- Si les ouvertures sont placée sur les deux façades dans le vent et sous le vent, la vitesse moyenne est beaucoup plus élevée, et elle dépend des dimensions de l'entrée et de la sortie de l'air et de la relation entre la direction du vent et l'axe joignant les deux issues ;
- Il n'est pas nécessaire d'orienter la façade principale d'un bâtiment long de façon que le vent pénètre perpendiculairement par les ouvertures ;
- Il est possible de provoquer une ventilation transversale dans les pièces ne disposant qu'une seule paroi extérieure, avec laquelle la direction du vent fait un angle de plus de 60°, en équipant chaque fenêtre de la paroi en question d'une saillie verticale.

D'après (D. Wright, 1978) le débit d'air pénétrant à travers l'ouverture d'une pièce est plus efficace lorsque la direction du vent ne s'éloigne de 30° à la normale du plan de cette ouverture.

Les vents exercent une pression maximale lorsqu'ils sont perpendiculaires à une surface, et la pression est réduite d'environ 50% lorsque le vent a un angle oblique d'environ 45 °. Cependant, la ventilation intérieure est souvent meilleure avec les vents obliques, car elles génèrent un plus grand mouvement du vent à l'intérieur.²⁰

²⁰ Norbert Lechner.(2015) «Heating, cooling, lighting : sustainable design methods for architects;Fourth Edition».

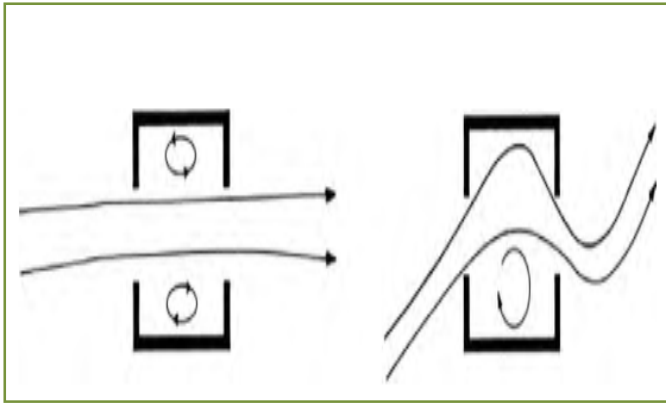


Figure II.49 : Effet du vent perpendiculaire et oblique (environ 45 °) à l'ouverture sur la ventilation intérieure [Norbert Lechner, 2015]

Lorsque le vent est oblique (à 45 °) à l'ouverture d'entrée de la même pièce, la majeure partie du volume d'air prend un mouvement turbulent autour de la pièce, augmentant le flux d'air le long des parois latérales et dans les coins.²¹

b. Influence de l'emplacement des fenêtres

L'ouverture d'entrée détermine non seulement la vitesse, mais détermine également le profil de flux d'air dans la pièce, en revanche, l'emplacement de la sortie a peu d'effet sur la vitesse de l'air et le profil de flux d'air. (Norbert Lechner, 2015)

Des études réalisées par (Texas Engineering Experiment Station, 1954)²² ont montré que l'emplacement de la sortie n'affectait pas le modèle d'écoulement d'air de manière significative, l'emplacement de l'entrée contrôlait le modèle d'écoulement d'air.

Dans une pièce avec deux fenêtres dans des murs opposés, où l'entrée directement face au vent extérieur, le flux d'air principal s'écoule directement de l'entrée à la sortie et, en dehors des turbulences locales aux coins de la paroi de sortie, le reste de la pièce est légèrement affecté. Le flux d'air est léger le long des parois latérales, en particulier dans les coins de la paroi de la fenêtre d'entrée.²¹

²¹ Mahbuba Afroz Jinia et Saiful Hasan Tariq. (2012) «Performance of south facing windows for indoor ventilation & thermal comfort at Dhaka».

²² R. F. White. (1954) «Effects of Landscape Development on the Natural Ventilation on Buildings and Their Adjacent Areas. RR-45, College Station, TX: Texas A&M University, Texas Engineering Experiment Station».

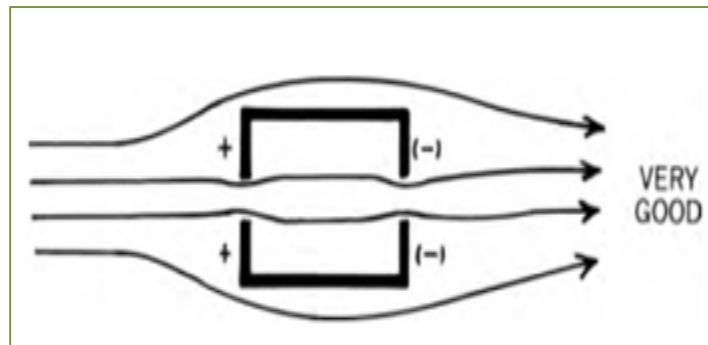


Figure II.50 : Ventilation transversale par deux fenêtres dans des murs opposés
[Norbert Lechner, 2015]

D'autre part, si deux fenêtres sont situées dans des murs adjacents, une meilleure ventilation est obtenue avec le vent perpendiculaire à la fenêtre d'entrée que lorsqu'il est oblique.²¹

La ventilation des fenêtres sur les parois adjacentes peut être bonne ou mauvaise, selon la distribution de la pression, qui varie selon la direction du vent. (Norbert Lechner, 2015)

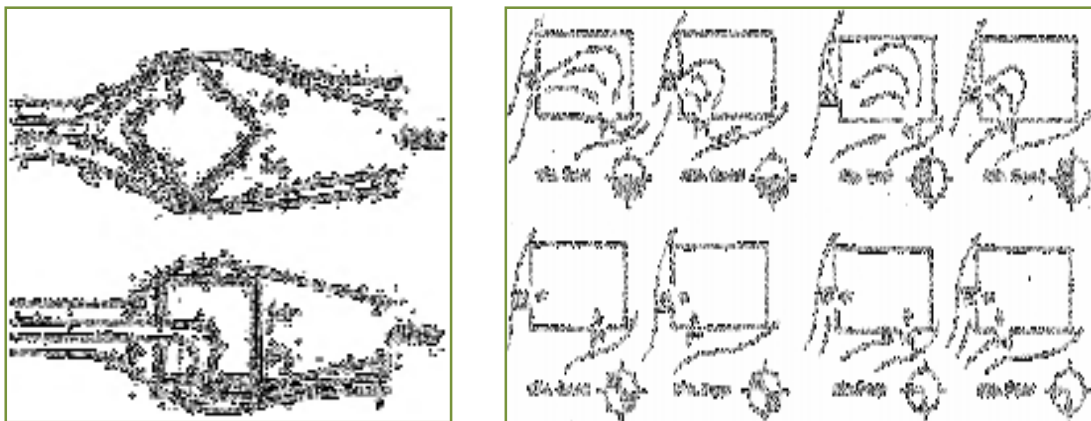


Figure II.51: Influence des fenêtres sur des murs adjacents sur la Ventilation
[Norbert Lechner, 2015]

La ventilation des fenêtres sur un côté d'un bâtiment peut varier de juste à médiocre, selon l'emplacement des fenêtres. Étant donné que la pression est plus grande au centre de la paroi de vent que sur les bords, il y a une certaine différence de pression dans le placement asymétrique des fenêtres, alors qu'il n'y a pas de différence de pression dans le schéma symétrique. (Norbert Lechner, 2015)

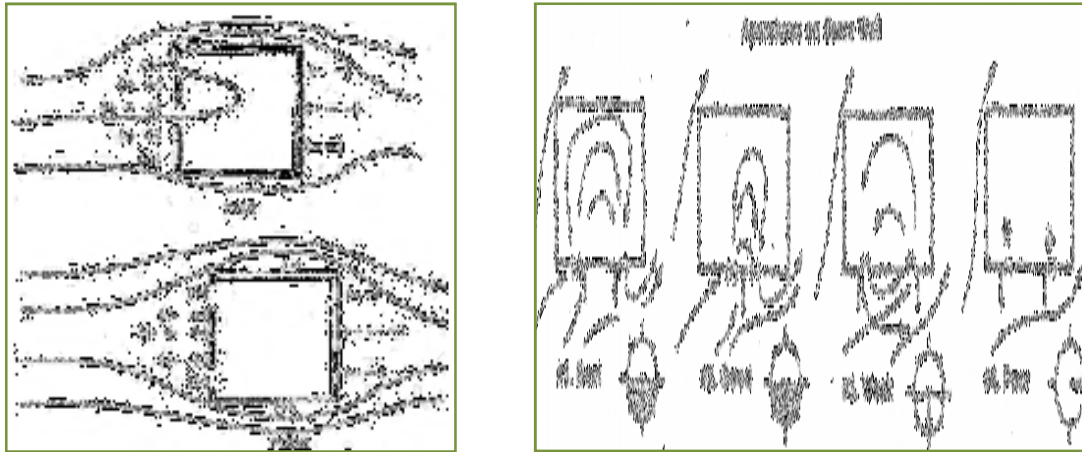


Figure II.52 : Influence des fenêtres sur un côté des murs sur la Ventilation
[Norbert Lechner, 2015]

c. Influence de la position verticale des fenêtres

La position de l'orifice de sortie du flux d'air n'influence pas beaucoup la ventilation transversale; la position de celui d'entrée est nettement plus importante pour obtenir une bonne ventilation transversale.²³

Pour la ventilation de confort, les fenêtres devraient être basses, au niveau des occupants dans la chambre. En plus des fenêtres hautes ou des événements de plafond devraient être considérés pour évacuer l'air chaud qui se rassemble près du plafond. Les ouvertures hautes sont également importantes pour le refroidissement nocturne où l'air doit passer sur la structure du bâtiment. (Norbert Lechner, 2015)

Une entrée haute dirige le flux d'air près du plafond, alors qu'une entrée de faible à moyenne hauteur dirige le flux d'air vers le niveau des occupants. (R. F. White, 1954)

²³ Azeddine BELAKEHAL, Maître de Conférences Département d'architecture, Université Mohamed KHIDER 2ème année architecture LMD, Module: Théorie du projet.

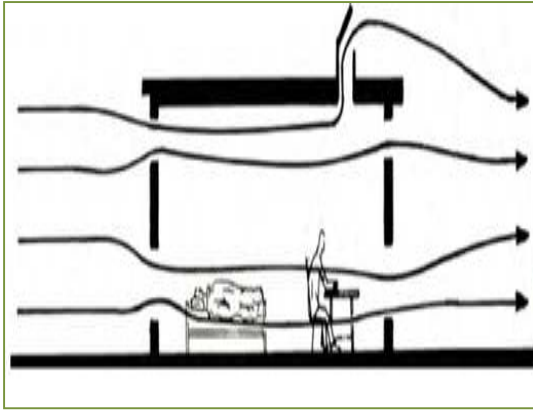


Figure II.53 : Effet de l'emplacement des fenêtres sur la ventilation [Norbert Lechner, 2015]

d. Influence des dimensions de la fenêtre

Généralement, la taille de l'entrée et de la sortie devrait être à peu près la même. Cependant, si une ouverture est plus petite, elle devrait généralement être l'entrée, car elle maximise la vitesse du flux d'air intérieur, et c'est la vitesse qui a le plus grand effet sur le confort. (Norbert Lechner, 2015)

Si la dimension de l'entrée est plus grande que la sortie, la vitesse du vent est réduite; à l'inverse, si l'entrée est plus petite, la vitesse de sortie du vent est augmentée.²³

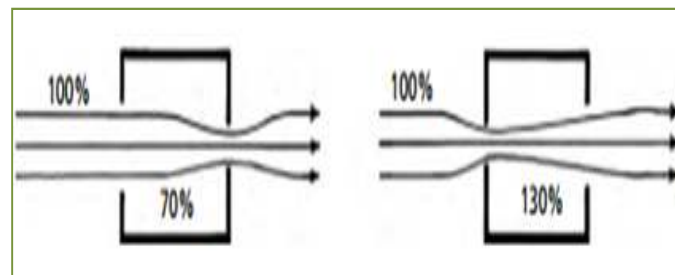


Figure II.54 : Effet de la taille de l'entrée et de la sortie sur la vitesse de l'air intérieur

[Norbert Lechner, 2015]

(C. Tantasavasdi, J. Srebric, et al., 2001) ont constaté que les performances de ventilation sont meilleures avec une entrée plus grande que la sortie. Une grande entrée peut également fournir un débit de ventilation plus élevé. De son côté (R. F. White, 1954) a trouvé que le débit d'air a été maximisé par des zones d'entrée et de sortie égales, les vitesses dans les chambres ont été maximisées localement (en particulier près de l'entrée) si la sortie était légèrement plus grande que l'entrée.

e. Influence de type des fenêtres

Le type et la conception des fenêtres ont un grand effet sur la quantité et la direction du flux d'air. Bien que les fenêtres à double guillotine, à guillotine simple et coulissante ne changent pas la direction du flux d'air, elles bloquent au moins 50% du débit d'air. (Norbert Lechner, 2015)

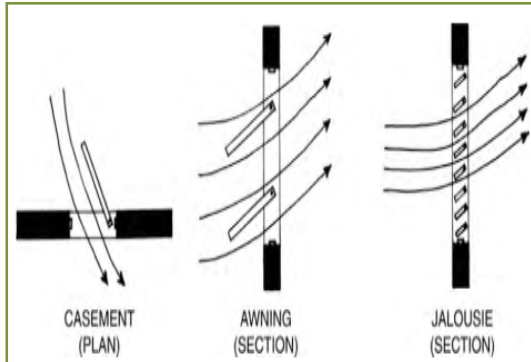


Figure II.55 : Effet des différents types de fenêtre sur la direction de flux d'air. [Norbert Lechner, 2015]

D'autre part, les fenêtres pivotantes et fenêtres à lames mobiles jouent un rôle de déflecteur qui peut orienter la direction du flux l'air vers le bas de l'espace à ventiler (Mokeddem Mahmoud, 2012).



Figure II.56 : Influence des fenêtres pivotantes et à lames sur la ventilation. [Olgyay, V.1963]

Les lamelles orientables peuvent ramener vers le bas le courant d'air qui aurait tendance à passer trop haut, à condition toutefois que le système de rotation des lamelles permette de leur donner l'inclinaison convenable.²³

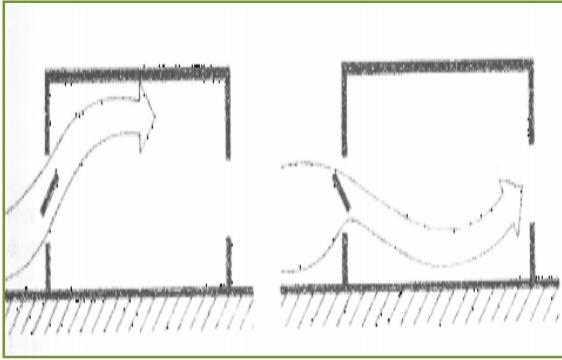


Figure II.57 : Effet des lamelles orientables sur la quantité et la direction du flux d'air.

[Azeddine Belakehal,]

Une étude réalisée par (GAO, Cai Feng and LEE, Wai Ling ,2010) sur l'impact des types de fenêtres tel que la fenêtre coulissante, la fenêtre oscillo-battante avec deux systèmes d'ouvertures différents : à la française et à soufflet, sur la ventilation naturelle des bâtiments résidentiels à Hong Kong. Les résultats ont montré que :

- La fenêtre coulissante se comporte mieux pour la ventilation naturelle.
- La fenêtre oscillo-battante avec le système d'ouverture à soufflet(en haut) est la plus mauvaise dans l'efficacité de la ventilation naturelle.

(P.Heiselberg, K. Svidt et al.,2001) ont montré par une série de mesures de laboratoire effectuées sur deux types de fenêtres différentes (a battant simple et a soufflet) pour déterminer les caractéristiques du flux d'air dans les chambres, que pour les stratégies de ventilation unilatérale et transversale, la fenêtre a soufflet est meilleure en hiver car l'air doit parcourir plus de distance avant d'atteindre la zone occupée, tandis qu'en été, la fenêtre a battant simple est préférée à la fenêtre a soufflet en admettant suffisamment d'air dans l'espace intérieur.

f.Influence de dispositifs architecturaux lié ou détaché de la façade

Certains dispositifs architecturaux peuvent modifier le flux à l'intérieur d'une pièce, même si la disposition des ouvertures est identique:

- Un auvent plein peut introduire une dissymétrie dans la répartition des pressions et orienter le courant d'air vers le haut;
- Un intervalle, même modeste, entre l'auvent et la façade rétablit la symétrie.²³

Un auvent horizontal placé au-dessus de la fenêtre orientera le flux d'air vers le plafond, car il empêche la pression positive au-dessus de lui d'équilibrer la pression positive sous de la fenêtre. (Norbert Lechner, 2015)

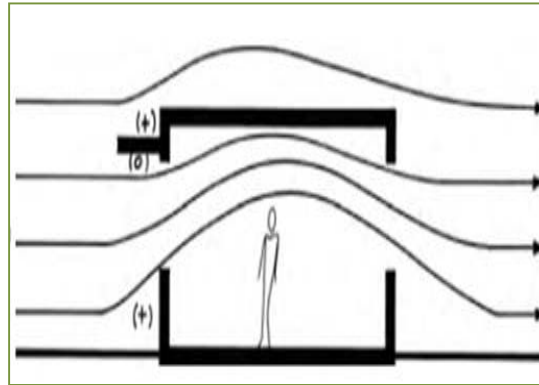


Figure II.58 : Effet de l' auvent horizontal sur l'orientation du courant d'air vers le haut .[Norbert Lechner 2015]

Cependant un auvent en lamelles ou des fentes de 15 cm ou plus dans l'auvent permettra au flux d'air de se redresser. Le placement de l'auvent plus haut sur le mur peut également diriger le flux vers le bas pour les occupants. (Norbert Lechner, 2015)

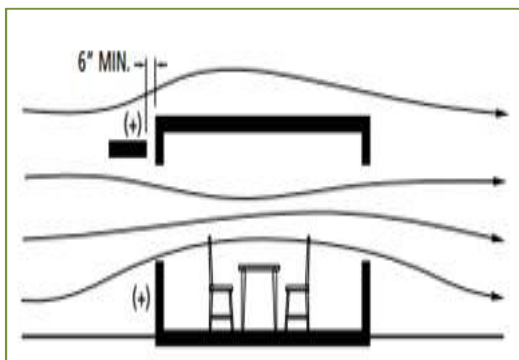


Figure II.59 : Influence des fentes au niveau de l'auvent sur la ventilation.
[Norbert Lechner, 2015]

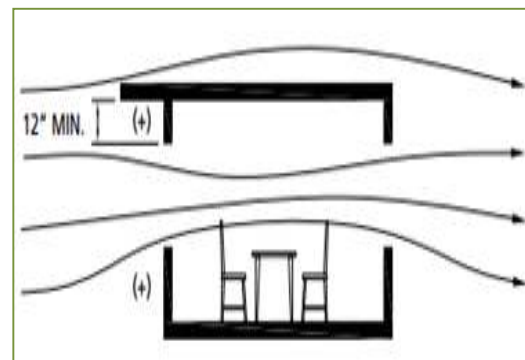


Figure II.60 : Influence de l'avancée de toiture sur la ventilation.
[Norbert Lechner, 2015]

Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un état de l'art autour des différents facteurs essentiels influencés par la fenêtre et par conséquent sur l'ambiance thermique et respiratoire intérieure.

La température et la qualité de l'air à l'intérieur d'un espace dépendent de diverses configurations de fenêtres, à savoir l'orientation de la fenêtre, de l'emplacement, de la forme, du type, de la taille et de l'accessoire de fenêtre.

Les différents types de confort cités dans ce chapitre sont mis en évidence dans la partie expérimentale, afin de vérifier l'efficacité de la fenêtre.

II

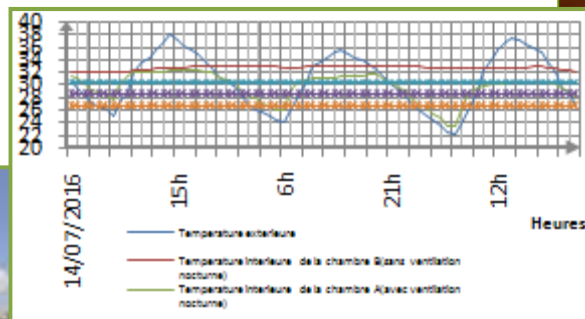
CAS D'ETUDE

DEUXIEME PARTIE

03

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 03



Introduction

Le présent chapitre est consacré au travail expérimental. L'investigation est menée sur un ancien hôtel « Marhaba » situé au cœur de la ville de Laghouat (zone chaude et aride). Il fut érigé en 1939 par une chaîne française « transatlantique ». Dans les années soixante (1967) l'architecture de l'hôtel a été revue par l'architecte français « Fernand Pouillon » qui y fit ajouter une grande aile.

Une campagne de mesure a été effectuée dans l'espace chambre pour évaluer l'effet de la ventilation nocturne sur le confort thermique dans les constructions à forte inertie en période estivale.

Deux chambres ont une inertie thermique élevée ont été surveillés pendant l'été. Les mesures des différents paramètres (température et vitesse du vent) sont effectuées pour deux cas, avec ventilation naturelle nocturne et sans ventilation naturelle nocturne. Les résultats des mesures sont présentés et discutés.

III.1-Les Données climatiques de la zone d'étude

III.1.1-situation de la ville de Laghouat

La ville de Laghouat est située au piedmont de l'Atlas Saharien à une altitude moyenne de 750 mètres à l'intersection de deux axes structurants la RN1 et la RN23. Elle est définie par les coordonnées (latitude 33°46'N et longitude 2°56' E). (H.Bencheikh, 2007)

Le relief de la région est en général plat à pente moyenne et faible de 0,1% à 4 %. Elle est caractérisée en été par un climat chaud et sec.

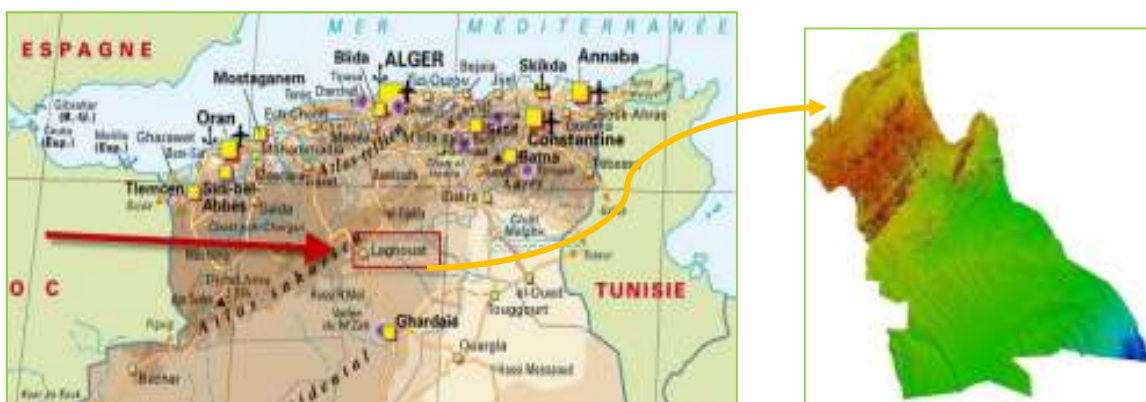


Figure III.1 : Situation géographique de la ville de Laghouat [www.jevisitelalgerie.com]

III.1.2-Les conditions climatiques

En Algérie, la première classification en zones climatiques a été faite par le CSTB¹ en 1962. On définit les zones suivantes:

- 4 zones climatiques et une sous zone au Nord.
- 3 zones climatiques au Sud.

La zone concernée par notre étude se trouve dans la zone D1, elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°.

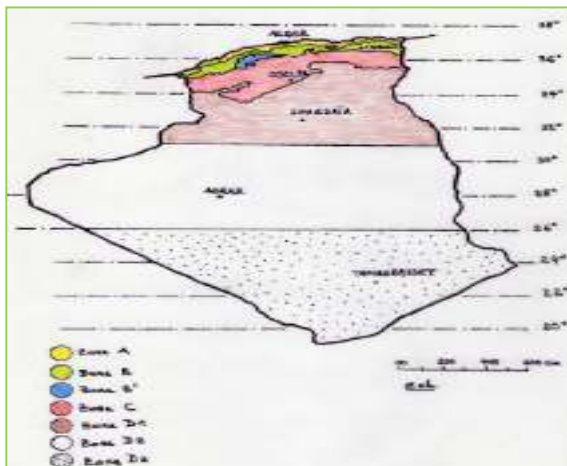


Figure III.2: Carte de découpage des zones climatiques en Algérie [https://fr.scribd.com]



Figure III.3: Situation de Laghouat dans la carte des zones climatiques [www.mem-algeria.org]

Une autre classification plus récente a été faite par le CNERIB², en zones d'été (5 zones: **E1, E2, E3, E4, E5**), et zones d'hiver (3 zones: **H1, H2, H3**, avec des sous-zones).

D'après le découpage en zones climatiques du territoire Algérien (Figure III.4 a,b), la ville de Laghouat fait partie de la zone climatique **E3** (zone d'été) et **H3a** (zone d'hiver) déterminée par deux saisons principales :

- Un été très chaud et sec mais moins pénibles qu'en zone E4.
- Un hiver très froid la nuit par rapport au jour. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants.³

¹ CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

² CNERIB : Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment

³ Ministère de l'habitat. (1993) « Recommandations Architecturales ENAG éditions, Alger, p 9»

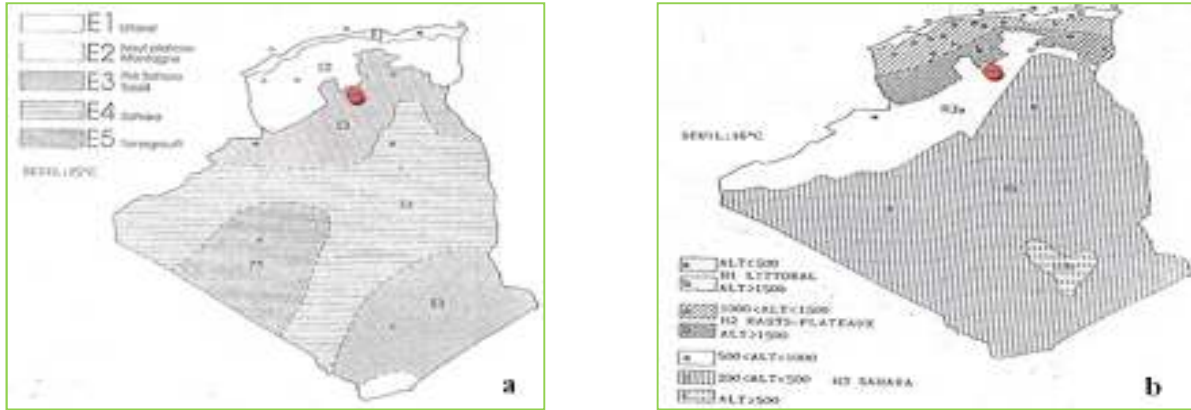


Figure III.4 : a) Les zones climatiques d’été. b) Les zones climatiques d’hiver.

[Ministère de l’habitat, 1993]

III.1.2.1-La température de l’air

Selon les données recueillies par la station météorologique (Figure III.5), nous constatons que la courbe des températures moyennes mensuelles pour la région de Laghouat (2016) présente une évolution régulière. La température moyenne annuelle des températures de l’air est de 19.58 °C. Cette dernière est maximale au mois de juillet avec une valeur de 31.2 °C (mois le plus chaud) et minimale au mois de décembre avec une valeur de 9.3°C (mois le plus froid).

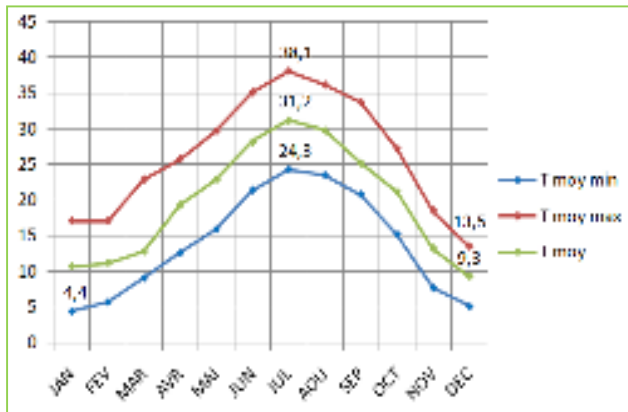


Figure III.5: Variation des Températures de l’air extérieur (2016) [Station météorologique]

III.1.2.2-Ensoleillement

L’intensité des radiations solaires varie en fonction de la durée d’insolation, de la hauteur du soleil au-dessus de l’horizon, et de l’inclinaison de ses rayons sur la surface frappée.

Les courbes représentatives de l’ensoleillement dans la ville de Laghouat (2016) (Figure III.6 et III.7), révèlent que :

- La durée d'ensoleillement dépasse les 14 heures par jour au mois de juin, alors qu'elle diminue de manière significative pendant la période froide pour atteindre environ 09h par jour au mois de décembre.
- Au solstice d'hiver la trajectoire solaire garde une hauteur minimale (21 décembre, jour le plus court de l'année) qu'au solstice d'été (21 Juin jour le plus long de l'année), sa hauteur est maximale.
- Une surface verticale reçoit donc le maximum de radiation au solstice d'hiver, par contre la surface horizontale reçoit le maximum d'énergie solaire au solstice d'été.



Figure III.6: Diagramme solaire indiquant la trajectoire solaire pour la ville de Laghouat (latitude 33° 46') [www.sunearthtools.com]

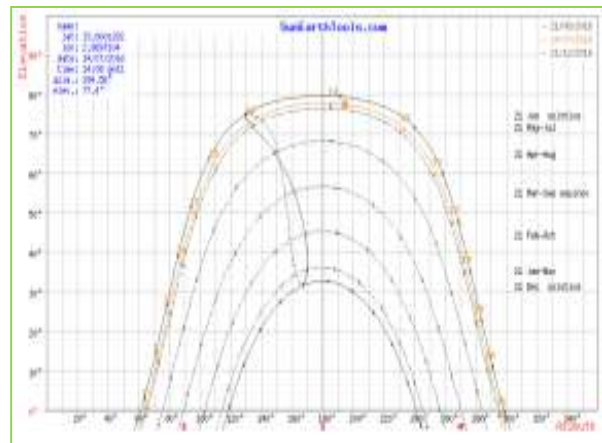


Figure III.7: Position du soleil (de bas en haut) au solstice d'hiver, aux équinoxes et au solstice d'été dans la ville de Laghouat [www.sunearthtools.com]

III.1.2.3-Le vent

Cet élément est défini par deux paramètres : Sa vitesse moyenne et sa direction.

Les vents dominant sont de direction Ouest et Sud-Ouest, le SIRICCO souffle 65-70 jours par an à partir de mois de Mai et cause de graves préjudices aux cultures, il est fréquent du côté Nord et Ouest, généralement en Juillet sur les hautes terres du Nord et de l'Ouest, Ainsi que dans les mois de Juin et Juillet sur les basses terres.

Le chehili venant du Sud provoque certaines dégât, dessèchements, ces vents sont souvent violents et leur vitesse varie de 15 à 30 m/s soit 58 à 108 Km/h et de direction Sud-ouest fréquence 687 heures/mois. Ce sont des vents fréquents et cycliques : le Sahraoui vient du Nord-Ouest /Sud-est au printemps, tandis que le Bahri de direction Est-Ouest se manifeste d' Août à Octobre, a partir de Septembre, le vent de l'Est (Bahri) chargé d'humidité favorise le rafraichissement de la ville.(K.Benarfa, 2007)

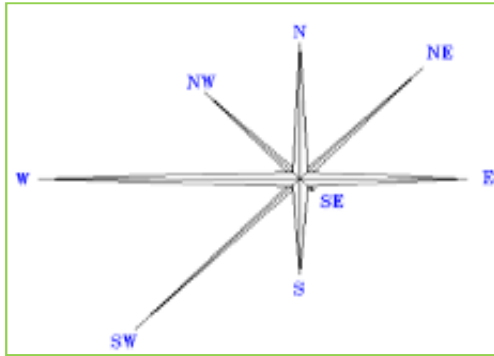


Figure III.8: Rose des vents de la ville de Laghouat. [Station météorologique]

III.1.2.4-Les précipitations

La ville de Laghouat est classée dans la zone où les précipitations ne dépassent pas les 111.5 mm. (K.Benarfa, 2007)

Le mois le plus arrosé est Septembre avec 28.2 mm et le mois le plus sec est Janvier avec 0.2mm. On remarque aussi que la répartition des précipitations durant l'année est irrégulière. (Figure III.09)

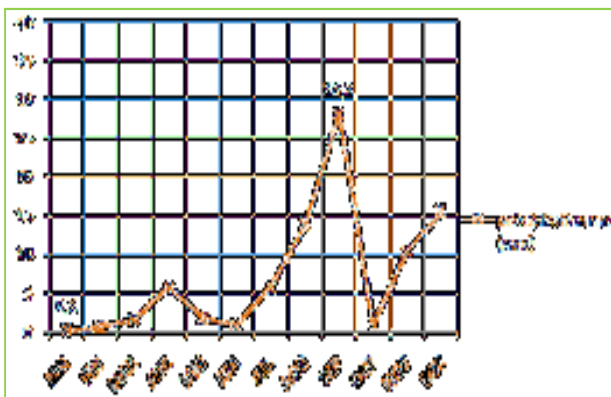


Figure III.09: Les précipitations moyennes mensuelles de la ville de Laghouat (2016) [Station météorologique]

III.1.2.5-L'humidité relative

La station météorologique de la ville de Laghouat enregistre, le plus haut taux d'humidité (46%) pendant le mois de janvier, et le plus bas (16%) pendant le mois de Novembre (Figure III.10).

Les humidités les plus élevées correspondent aux mois les plus froids et vice versa; ce qui suggère que le climat de la ville de Laghouat est humide et froid en hiver et assez sec et chaud en été.

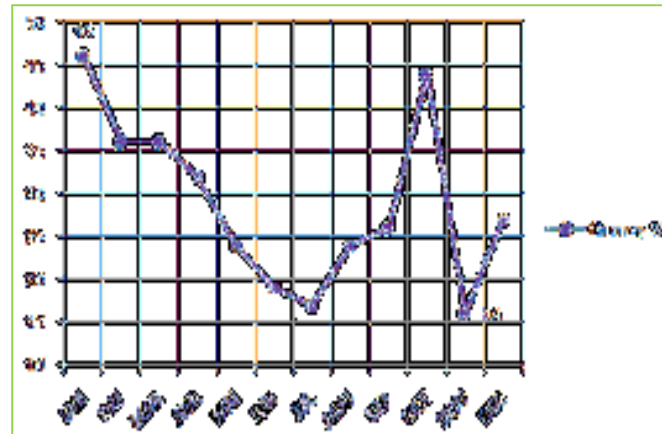


Figure III.10: Les variations mensuelles de l'humidité relative de la ville de Laghouat (2016) [Station météorologique]

III.2-Le diagramme bioclimatique de Givoni

La méthode de Givoni consiste à évaluer les exigences physiologiques du confort .elle est adaptée pour traiter de l'intelligence thermique d'un projet en face des conditions climatiques d'un site. La zone de confort est positionnée au centre, entre les températures 20 et 26°C. Sur ce diagramme sont représentées des procédures permettant de réintégrer les conditions de confort:

- La zone des conditions hygrothermiques compensables par la ventilation naturelle ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la ventilation nocturne ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation;
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent une ventilation naturelle et mécanique ;
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent un chauffage passive.

III.3-Présentation du cas d'étude

III.3.1-Le cas d'étude « hôtel Marhaba »

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre a été réalisée dans un ancien hôtel Marhaba « ex-hôtel transatlantique » situé au cœur de la ville de Laghouat sur le boulevard de l'indépendance. Il fut construit en 1939 par une chaîne française « transatlantique ». Dans les années soixante (1967) l'architecture de l'hôtel a été revue par l'architecte français « Fernand Pouillon » qui y fit ajouter une aile.



Figure III.12: Situation de l'hôtel par rapport à la ville. [Google earth]



Figure III.13: Plan de masse de l'hôtel.



Figure III.14: Façade de l'hôtel sur la rue. [Auteur]

Une grande aile à l'alignement de la rue a été ajoutée pour installer les chambres. Cette aile se présente comme un mur très fermé et rigoureux .Il protège une oasis de verdure intérieure qui s'organise autour d'une piscine ronde. L'effet de contraste est ménagé jusque dans la conception des façades. La façade sur jardin est largement percée de deux arcs superposés dont les formes adoucies annoncent déjà l'architecture du m'zab.ces arcs forment des loggias pour les chambres, leur desserte se faisant coté rue. Parties anciennes et nouvelles s'imbriquent de façon indiscernable. (Bernard Felix Dubor,1986)



Figure III.15: La coursive [Auteur]



Figure III.16: Les loggias des chambres [Auteur]

III.3.2-Les pièces instrumentées (chambres)

III.3.2.1- Choix des pièces instrumentées

L'hôtel possède une surface totale de plancher de 1100 m² distribuée sur 3 niveaux. Il est composé de 49 chambres. Les chambres qui ont été instrumentés se situaient au 2ème étage (Figure III.17).



Figure III.17: Les chambres instrumentées
[Auteur]

Figure III.18: Plan générale de l'hôtel (2^{ème} étage)

Pour notre étude, nous avons choisi deux chambres représentatives de l'ensemble des chambres qui sont la chambre n° 42 et la chambre n°43 (Figure III.19).



Figure III.19: Plan du 2^{ème} étage (Chambre N°42 et N°43 : pièces d'investigation). [Auteur]

Les critères de choix de ces locaux types sont :

- Les chambres sont situées dans le 2^{ème} étage, elles présentent un meilleur exemple de ventilation naturelle.
- Pour la technique de la ventilation naturelle, les deux ouvertures sont opposées et donnant sur l'extérieur (la porte donnant sur la coursive et la porte fenêtre donnant sur la loggia).
- Les parois ne sont pas exposées au rayonnement solaire direct (la coursive et la loggia).

III.3.2.2- Description des pièces instrumentées

Les pièces choisies par cette investigation sont deux chambres identiques dans tous les paramètres géométriques et architecturaux. Elles ont une configuration rectangulaire, plus profonde que large (profondeur : 7.50m, largeur : 3.60m) et offrent une surface utile de 27m². La hauteur sous plafond est de 2,55m.



Figure III.20: La chambre n° 42. [Auteur]



Figure III.21: La chambre n° 43. [Auteur]

La façade orientée vers le nord-ouest dispose d'une porte-fenêtre coulissante et une fenêtre donnant sur la loggia. Elles sont dotées d'une protection intérieure (rideau) contre les insulations d'été.

La dimension de la porte-fenêtre est de 0,85m x 2,05 m dans un encadrement en bois peint en blanc, le vitrage est simple.

La dimension de la fenêtre est de 1,45m x 1,45m dans un encadrement en bois peint en blanc, le vitrage est simple.

L'autre façade orientée vers le sud-est dispose d'une porte donnant sur la coursive.

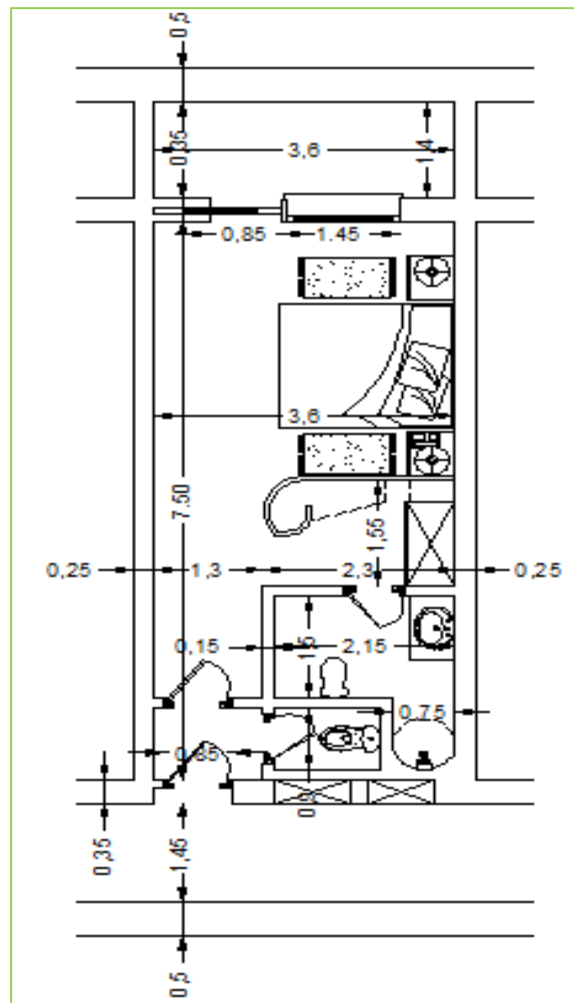


Figure III.22: Détail d'une chambre. [Auteur]

Tableau III. 1 : Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés.

[D.T.R. C 3-2,1998 ; réadapté par l'auteur]

Nom	Conductivité (λ) (W/m.°C)	Masse volumique (ρ) (Kg/m ³)	Capacité thermique (c) (J/Kg. °C)
Pierre	2.4	2500	936
Parpaing	1.1	1185	1080
Bloc de béton plein	1.75	2300	1080
Mortier de bâtard	1.15	1900	1080
Mortier de chaux	0.87	1080	1080
Sable sec	0.6	1300	823
Dalle de compression + Corps creux	1.75	2500	1080
Enduit de plâtre	0.35	850	936
Mortier de pose	1.4	2200	300
Carrelage grés	1.2	2200	260
Lame d'air	0.28	1	1008
Bois	0.23	2160	600
Verre	1.1	2700	792

Ces matériaux sont utilisés pour composer les constructions appliquées aux différents éléments du bâtiment.

Tableau III. 2 : Composition des éléments de construction utilisés. [Auteur]

Construction	Composition	Epaisseur (m)	Epaisseur totale (m)
Mur extérieur (1) (Nord-Ouest)	Mortier de chaux	0.01	0.37
	Pierre	0.35	
	Enduit de plâtre	0.01	
Mur extérieur (2) (Sud-Est)	Mortier de chaux	0.01	0.56
	Pierre	0.35	
	Lame d'air	0.04	
	Bloc de béton plein	0.15	
	Enduit de plâtre	0.01	
Mur intérieur (1)	Enduit de plâtre	0.01	0.27
	Parpaing	0.25	
	Enduit de plâtre	0.01	
Mur intérieur (2)	Enduit de plâtre	0.01	0.17
	Bloc de béton plein	0.15	
	Enduit de plâtre	0.01	
Plancher intermédiaire	Enduit de plâtre	0.01	0.235
	Corps creux	0.16	
	Dalle de compression	0.04	
	Mortier de pose	0.01	
	Carrelage grés	0.015	
Toiture	Couche de chaux	0.005	0.415
	Mortier bâtard	0.04	
	sable	0.12	
	Mortier bâtard	0.04	
	Dalle de compression	0.04	
	Corps creux	0.16	
	Enduit de plâtre	0.01	
Porte	Bois	0.05	0.05
Fenêtre	Cadre en bois	0.035	0.04
	Vitrage simple	0.005	
Porte fenêtre	Cadre en bois	0.035	0.04
	Vitrage simple	0.005	

III.4-Les instruments de mesure utilisés

Afin de mesurer la température de l’air intérieur et la vitesse du vent, les instruments de mesures suivants ont été utilisés : un hygro-thermographe du modèle « 1.0660 », une station météorologique PCE-FWS20 et un thermomètre digital à sonde intégrée du modèle « Testo 415 ».

Tableau III.3: Les instruments de mesure utilise dans l’investigation. [Auteur]

Les instruments de mesures		Description
<p>▪ L’hygro-thermographe « 1.0660 »</p>		<p>Il permet d’enregistrer la variation horaire de la température et de l’humidité dans le même espace sans interruption durant toute une semaine.</p> <hr/> <p>Température : C° Humidité :%</p>
<p>▪ La station météorologique «PCE-FWS20 »</p>		<p>La station avec capteurs externes permet de mesurer la température de l’air intérieur, extérieur et la vitesse du vent.</p> <hr/> <p>Température : C° Vitesse du vent : Km/h</p>
<p>▪ Le thermomètre digital à sonde intégrée« Testo 415 »</p>		<p>Il sert à mesurer la Température de l’air et la vitesse du vent.</p> <hr/> <p>Température : C° Vitesse du vent : m/s</p>

III.4.1- Station météorologique

Les conditions extérieures (la température de l'air extérieur et la vitesse du vent) ont été mesurées à l'aide d'une station météorologique PCE-FWS20 avec des capteurs externes.

La station météorologique numérique est un appareil multifonctionnel se compose de deux parties séparées :

- La station base à écran tactile.
- les capteurs externes pour détecter les valeurs de mesure. (la direction du vent, la vitesse du vent, la température, l'humidité relative et la pluviosité).



Figure III.23: La station base à écran tactile.

[Auteur]



Figure III.24: Les capteurs externes.

[Auteur]

Les capteurs externes recueillent l'information des différents paramètres et les transfèrent à la station base à une distance maximum de 100 mètres. La transmission de données est effectuée normalement sans fils à un PC. L'avantage de la station météorologique numérique est qu'elle peut enregistrer les valeurs et les récupérer en tout moment.



Figure III.25: Emetteur solaire tactile.

[www.pce-instruments.com]



Figure III.26: Capteur de recharge de vitesse pour le vent.

[www.pce-instruments.com]



Figure III.27: Capteur de recharge de la direction du vent. [www.pce-instruments.com]



Figure III.28: Capteur de recharge de pluviométrie. [www.pce-instruments.com]

III.4.2-L'hygro-thermographe « 1.0660 »

Durant les jours d'investigation, la température de l'air intérieure des deux pièces instrumentées (la chambre ouverte «A» et la chambre fermé «B») a été enregistrée graphiquement par un hygro-thermographe. Il a été posé de façon permanente durant 3 jours successifs sur une table à une hauteur de 70 cm.



Figure III.29: L'hygro-thermographe pose à l'intérieur de la chambre [[Auteur](#)]



Figure III.30: L'hygro-thermographe. [[Auteur](#)]

L'hygro-thermographe «1.0660»: est un instrument pour la mesure et l'enregistrement de la température ambiante et de l'humidité relative de l'air. Le boîtier est fait d'une combinaison de plastic et de métal. Les lecteurs axes sont supportés par un palier de pivotement, le bras supérieur inscrit la température (0°C jusqu'à 70°C) tandis que l'inférieur inscrit l'humidité (0% à 100%).



Figure III.31: Les deux aiguilles qui inscrivent les températures et les humidités relatives. [<https://thiesclima.com/>]

Les résultats de mesures sont enregistrés sans interruption sur une bande de papier millimétré, qui est enroulé autour d'un tambour à horloge mécanique durant toute une semaine.

III.4.3- le thermomètre digital a sonde intégrée « Testo 415 »

Un autre instrument de mesure, thermomètre Testo 415 est un instrument manuel sert à mesurer la température de l'air et la vitesse du vent.



Figure III.32: le thermomètre digital a sonde intégrée. [Auteur]

Pour obtenir les différentes valeurs (température et vitesse de l'air simultanément) sur l'écran, on presse sur le bouton de l'influence à maintes reprises :

- La première presse mesure les valeurs instantanément.
- La deuxième presse affiche les valeurs maximales sauvegardées.
- La troisième presse affiche les valeurs minimales sauvegardées.
- La quatrième presse affiche la moyenne des valeurs obtenues.

III.5- Le déroulement de l'étude expérimentale

III.5.1- Description de l'expérimentation

Au cours de la période estivale (2016), nous avons effectué des mesures des différents paramètres (température et vitesse du vent) pendant le mois de juillet étant donné qu'il représente le mois le plus chaud de l'année, pour une durée de trois jours successifs (14/15/16) dans deux chambres expérimentales (A) et (B). Les mesures sont effectuées pour deux cas, avec ventilation naturelle nocturne et sans ventilation naturelle nocturne.

Pour assurer la ventilation nocturne la fenêtre et la porte fenêtre de la chambre (A) sont ouvertes du 21 heures du soir jusqu'au 6 heures du matin. Concernant la chambre (B), la porte et la fenêtre et la porte fenêtre sont fermées durant toute la journée.

Durant les jours d'investigation L'hygro-thermographe a été posé sur un plan utile situé à 70 cm du niveau du plancher de la pièce.

III.5.2-Conditions de déroulement des mesures

III.5.2.1-Pour la chambre (A)

- La chambre A est généralement fermée toute la matinée de 06h00 jusqu'à 21h00.
- Le vitrage de la porte fenêtre et la fenêtre est protégé par une simple protection des rayons solaire (un rideau en toile opaque fine de couleur mauve), qui sera fermé de 06h00 jusqu'à 21h00.
- Le rideau sera retiré à partir de 21h00.
- Le vitrage de la porte fenêtre et la fenêtre sera ouvert pour le refroidissement nocturne de 21h00 jusqu'à 06h00.
- La porte qui donne sur la coursive reste fermé.
- le rideau sera fermé à nouveau à partir de 06h00

III.5.2.2-Pour la chambre (B)

- Des joints adhésifs en caoutchouc seront installés autour des huisseries des portes et fenêtres pour éviter toutes les infiltrations d'air.
- La chambre B est généralement fermée durant les jours d'investigation.
- Le vitrage de la porte fenêtre et la fenêtre est protégé par une simple protection des rayons solaire (un rideau en toile opaque fine de couleur mauve), qui sera fermé durant les jours d'investigation.

III.6- Analyse et interprétation des résultats expérimentaux (Période estivale)

Au cours de l'été 2016, trois essais ont eu lieu du 14 au 16 juillet dans deux chambres expérimentales (A) et (B). Les mesures sont effectuées pour deux cas :

- Le 1^{er} cas : avec ventilation naturelle nocturne (chambre : A).
- Le 2^{ème} cas : sans ventilation naturelle nocturne (chambre : B).

Pendant l'expérimentation l'effet de la ventilation naturelle nocturne est assuré par l'ouverture de la porte fenêtre et la fenêtre du 21h du soir (la température intérieure de la chambre égale à la température de l'air extérieure) jusqu'au 06h du matin. Concernant le deuxième cas la chambre est fermée pendant 24h.

III.6.1-Les résultats de mesures de la température de l'air intérieure et extérieure

III.6.1.1-Le premier jour de prise de mesures de température de l'air : 14 Juillet 2016

La première journée de prise de mesures était le 14 Juillet 2016. Cette journée est caractérisée par un ciel clair (dégagé) avec un vent de vitesse maximale atteinte à 22h00 est de 0.45 m/s, la température extérieure varie entre 25.1°C (à 06 h00) et 38°C (à 14h00), avec un écart de 12.9°C.

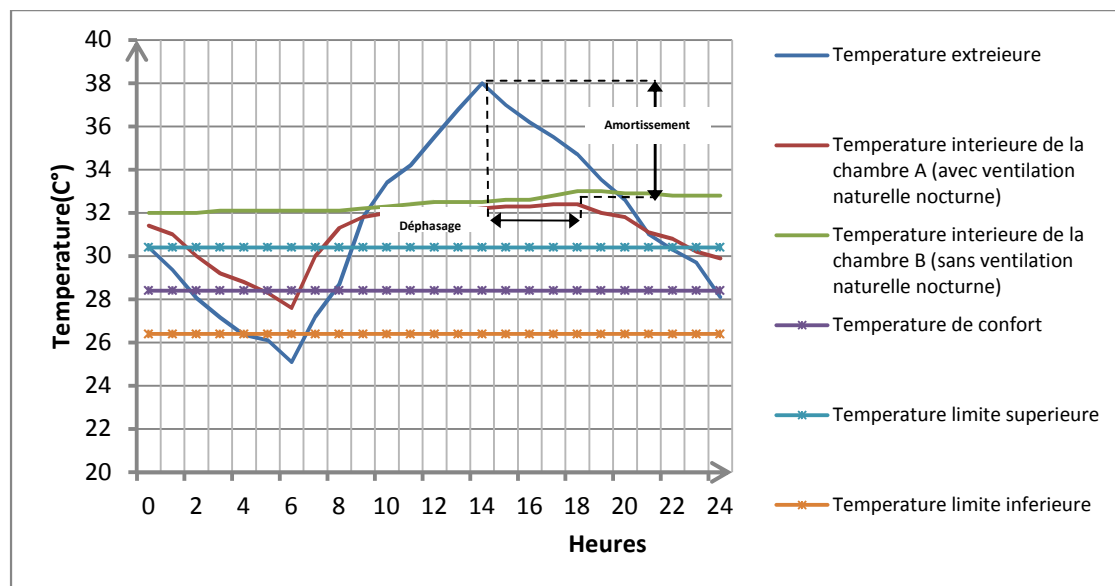


Figure III.33: Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentales, avec et sans ventilation naturelle nocturne (1^{er} essai : 14/07/2016).

La température de l'air intérieur de la chambre (B), sans ventilation naturelle nocturne est stable tout le long de la journée grâce à l'inertie du mur qui permet d'amortir la fluctuation de température extérieure, et en la déphasant dans le temps. Où la différence entre la température maximale 33°C et la température minimale 32°C est très faible, soit une amplitude de 1 °C. Alors que celle de la température de l'air intérieure de la chambre (A), avec ventilation naturelle nocturne varie entre une valeur minimale 27.6°C (à 06h00) et une valeur maximale 32.4°C (à 18h00), soit une amplitude de 4.8 °C .Après 19 h00 (coucher de soleil) les températures diminuent graduellement jusqu'à la température intérieure de la chambre devient supérieure ou égale a la température de l'air extérieure à 21h00. La ventilation se fait le soir par l'ouverture de la porte fenêtre et la fenêtre ,elle participe à décharger la chaleur due aux apports solaires et internes emmagasinée dans la masse de la chambre durant le jour et en même temps de rafraîchir la structure par l' effet de convection pendant la nuit. Afin de diminuer les températures intérieures du jour suivant par la fraîcheur emmagasinée dans la masse.

L'amplitude maximale enregistrée entre la température extérieure et celle de l'intérieur est de 5.6°C après 04h de temps de déphasage (Figure III.33).

En comparant la température intérieure des deux chambres, avec et sans ventilation naturelle nocturne, on constate que :

- La température intérieure de la chambre B (sans ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort établie d'après la température neutre de Humphrey. Cette zone est comprise entre la limite supérieure de 30.4°C et la limite inférieure de 26.4°C pour la période estivale (Voir annexe I).
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort entre 09h00 et 21h00.
- La ventilation nocturne a un effet faible sur la température intérieure pendant la journée entre 09h00 et 18h00. Ce qui s'explique par l'effet de la vitesse du vent faible du jour précédent.

III.6.1.2- Le deuxième jour de prise de mesures de température de l'air : 15 Juillet 2016

La deuxième journée de prise de mesures était le 15 Juillet 2016. Cette journée est caractérisée par un ciel clair (dégagé) avec un vent de vitesse maximale atteinte à 22h00 est de 0.60 m/s, la température extérieure varie entre 23.9 °C (à 06 :00) et 35.4C (à 14 :00), avec un écart de 11.5°C.

La température de l'air intérieure de la chambre (B), sans ventilation naturelle nocturne oscille entre une valeur minimale de 32.7°C et une valeur maximale de 33°C, soit une amplitude de 0.3 °C. Alors que celle de l'air intérieure de la chambre(A), avec ventilation naturelle nocturne varie entre une valeur minimale de 25.8°C (à 06h00) et une valeur maximale de 31.6°C (à 18h00), soit une amplitude de 5.8 °C.

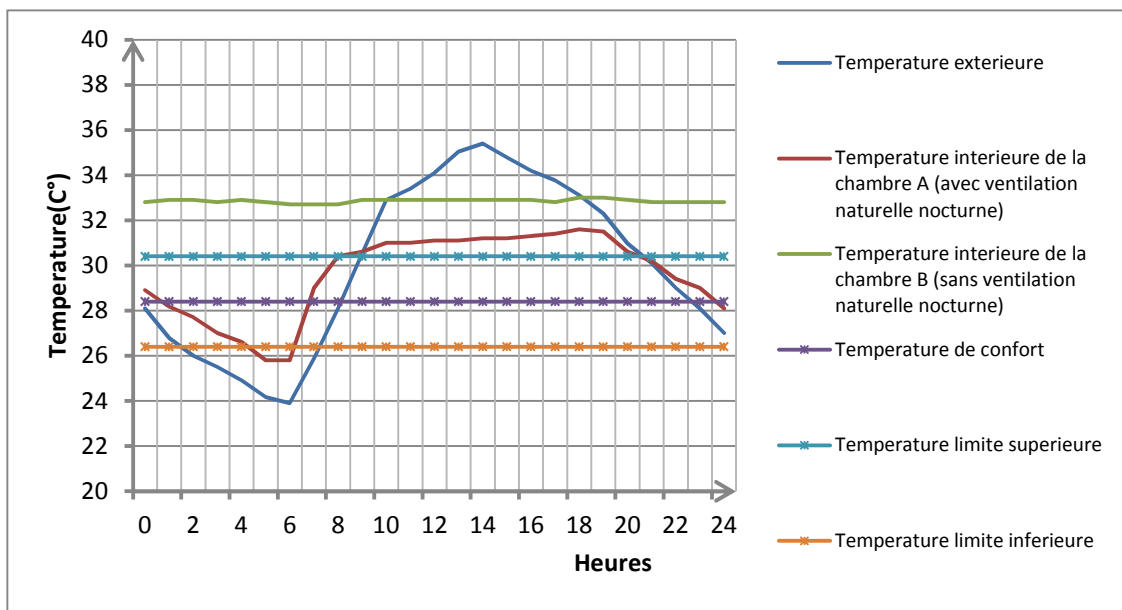


Figure III.34: Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentales, avec et sans ventilation naturelle nocturne (2^{ème} essai : 15/07/2016)

L'amplitude maximale enregistrée entre la température extérieure et celle de l'intérieur est de 3.8°C après 04h de temps de déphasage.

En comparant la température intérieure des deux chambres, avec et sans ventilation naturelle nocturne, on voit que :

- La température intérieure de la chambre B (sans ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort.
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort entre 09h00 et 21h00.
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) décroît pendant la journée entre 09h00 et 18h00 par rapport au jour précédent. Elle C'est-à-dire pendant la période nocturne, on remarque que la ventilation naturelle et la vitesse du vent ont une grande influence sur l'abaissement de la température intérieure.

III.6.1.3- Le troisième jour de prise de mesures de température de l'air : 16 Juillet 2016

La troisième journée de prise de mesures était le 16 Juillet 2016. Cette journée est caractérisée par un ciel clair (dégagé) avec un vent de vitesse maximale atteinte à 22h00 est de 0.81 m/s, la température extérieure varie entre 22°C (à 06 :00) et 37.4°C (à 14 :00), avec une amplitude de 15.4°C.

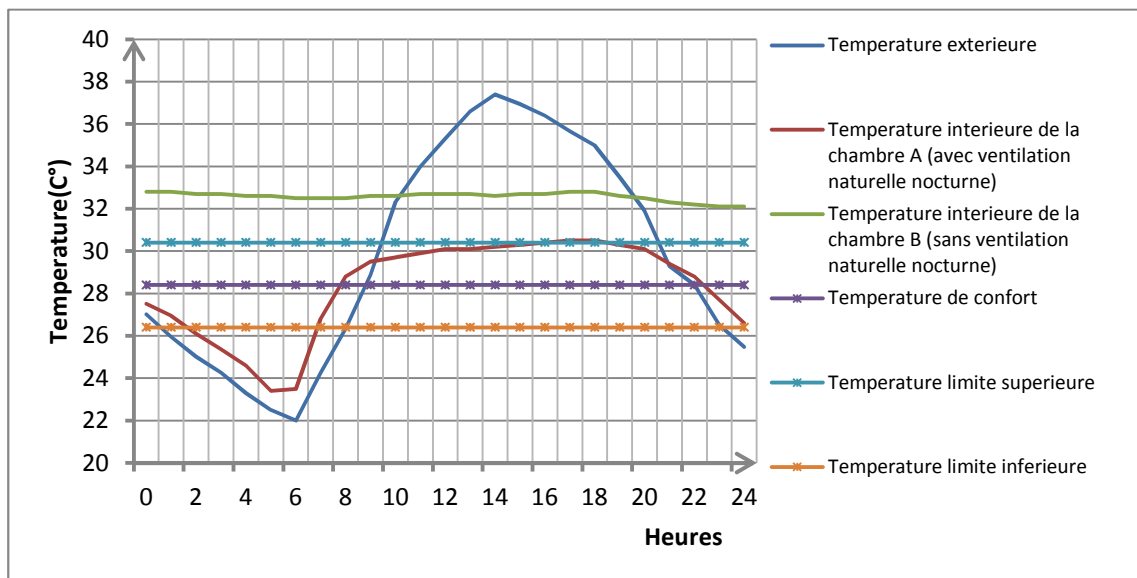


Figure III.35: Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentales, avec et sans ventilation naturelle nocturne (3^{ème} essai : 16/07/2016)

La température de l'air intérieure de la chambre (B), sans ventilation naturelle nocturne oscille entre une valeur minimale de 32.1°C et une valeur maximale de 32.8°C , soit une amplitude de 0.7°C . Alors que celle de l'air intérieure de la chambre(A), avec ventilation naturelle nocturne varie entre une valeur minimale de 23.5°C (à 06h00) et une valeur maximale de 30.5°C (à 18h00), soit une amplitude de 7°C .

L'amplitude maximale enregistrée entre la température extérieure et celle de l'intérieur est de 6.9°C après 04h de temps de déphasage.

En comparant la température intérieure des deux chambres, avec et sans ventilation naturelle nocturne, on remarque que :

- La température intérieure de la chambre B (sans ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort.
- La température intérieure de la chambre ventilée présente les meilleurs résultats par rapport aux autres jours d'investigations (elle est plus proche de la température limite supérieure de confort). Ce qui se traduit par l'effet de la vitesse du vent qui favorise l'accélération de l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur. Cet échange évacue la chaleur emmagasinée dans la masse du bâtiment pendant la journée et en même temps de rafraîchir la structure par l'effet de convection. Afin de diminuer les températures intérieures diurnes.

III.6.1.4- Synthèse

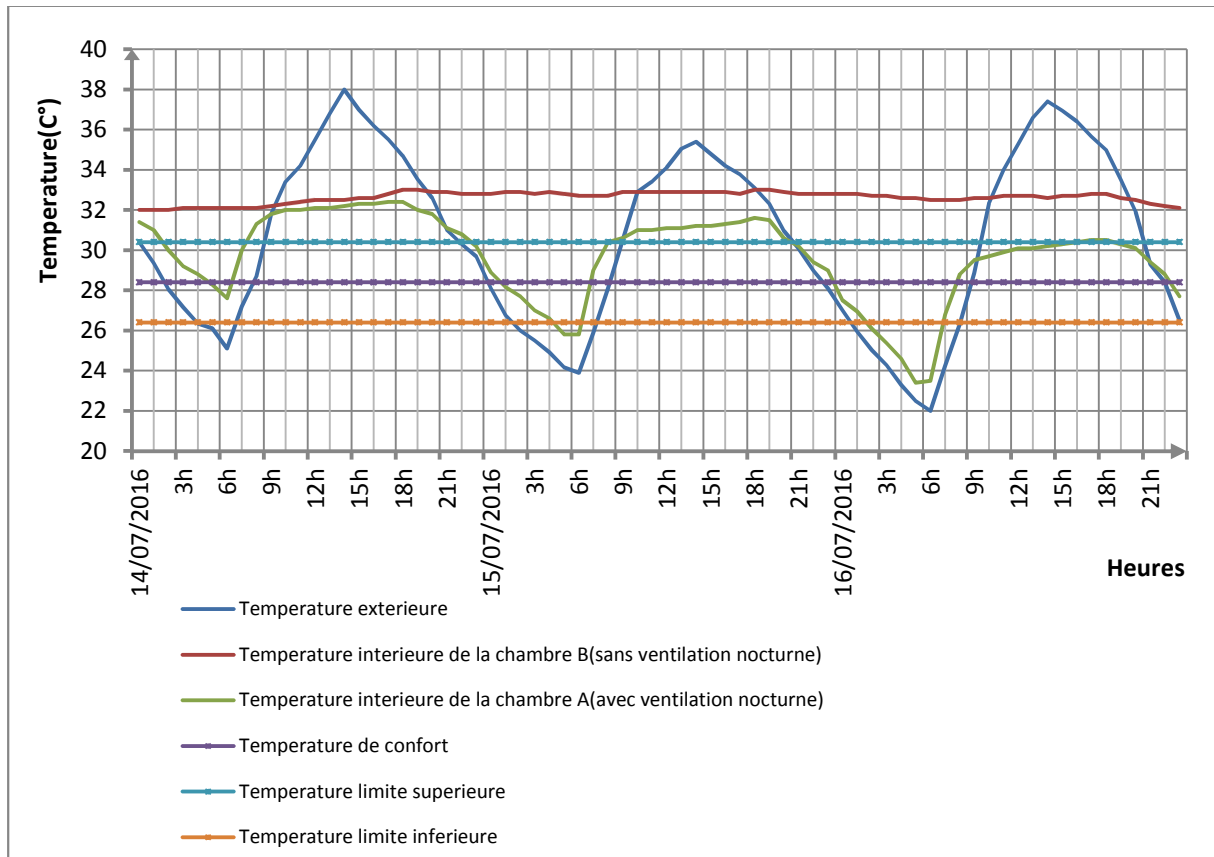


Figure III.36: Les variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux chambres expérimentales, avec et sans ventilation naturelle nocturne, du 14 au 16 juillet 2016.

La figure III.36 montre les diagrammes de température de l'air intérieur des deux chambres d'essai, avec et sans ventilation naturelle nocturne, pendant la période du 14 au 16 juillet 2016, ainsi que la température de l'air extérieur. Après les trois jours d'investigation, l'essai du 16 juillet 2016 présente les meilleurs résultats, la température intérieure de la chambre ventilée en période nocturne la plus élevée est de 30.5°C. Par contre la température intérieure maximale dans la chambre fermée durant 24heures est de 32.8°C. Tandis que la température extérieure maximale atteint les 37.4°C. Soit un écart maximal de température entre les deux chambres d'environ 2.3° C. L'écart maximal entre la température intérieure de la chambre ventilée et la température extérieure est de l'ordre de 6.9° C.

Les températures de l'air extérieurs les plus fraîches ont été enregistrées entre 04h00 à 06h00, et elles ont progressivement atteint un sommet à 14h00, puis elles ont abaissé graduellement jusqu'à la température intérieure de la chambre devient supérieure ou égale a la température de l'air extérieure à 21h00.

En comparant la température intérieure des deux chambres, avec et sans ventilation naturelle nocturne, on remarque que la chambre ventilée en période nocturne est plus efficace à celle fermée durant 24heures. Malgré que la température de l'air intérieur la chambre ventilée en période nocturne est légèrement supérieure à la température du confort estivale qui est de l'ordre de 26.4 à 30.4°C.

La température de l'air intérieur de la chambre fermée durant 24heures est stable tout au long de la journée grâce à l'inertie du mur qui permet de réduire l'écart entre les températures maximales et minimales intérieures. Elle écrase les températures maximales surtout le jour et elle les a déphasés dans le temps. Alors que celle de la température intérieure de la chambre ventilée en période nocturne tend à être inférieure à celle de l'extérieur de 08h00 jusqu'à 20h00 le soir grâce à l'effet de refroidissement nocturne qui peut être se prolonger pendant la journée. Durant la nuit de 22h00 à 07h00 la température intérieure dépasse celle de l'extérieure. Ce qui s'explique que la masse de la chambre se met à déstocker la chaleur emmagasinée par le biais de l'inertie du mur durant la journée.

Conclusion

Cette investigation prouve l'efficacité de la ventilation naturelle nocturne dans la création du confort thermique intérieur. Les résultats de l'expérimentation ont été évalués par le profil des températures internes. Quelques conclusions sont résumées ci-après:

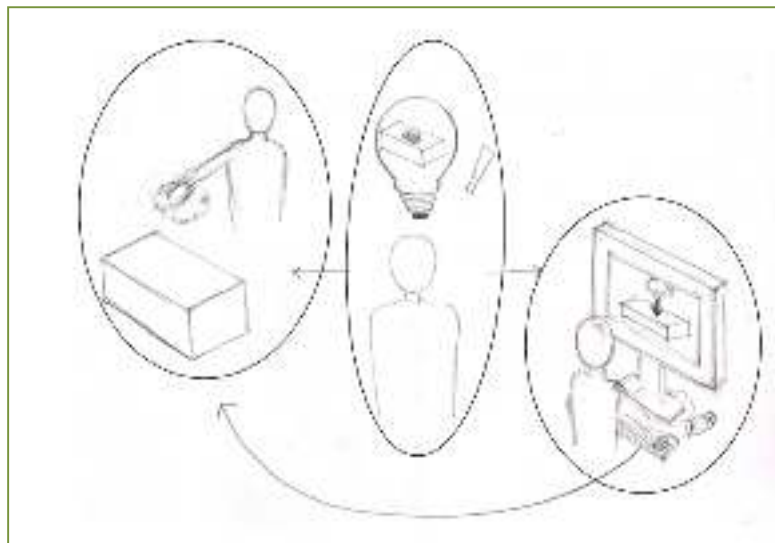
- La chambre ventilée en période nocturne est plus efficace à celle fermée durant 24heures.
- La température de l'air intérieur de la chambre fermée durant 24heures est stable tout le long de la journée grâce à l'inertie du mur qui permet de stocker les flux thermiques due aux températures extrêmes par la grande capacité thermique des matériaux utilisés.
- Un retard de pic de température interne par rapport au pic de température externe est plus évident dans la chambre ventilée en période nocturne.
- La forte inertie de la chambre diminue la variation des températures internes mais lorsque les températures extérieures descendent, l'intérieur reste chaud à cause de la chaleur stockée dans la masse.
- Pendant la nuit, les températures extérieures baissent. La ventilation nocturne doit être prise en compte pour garantir la dissipation de la chaleur stockée dans la structure.
- Lorsque la ventilation nocturne a été appliquée, des réductions importantes de la température interne diurne ont été obtenues par rapport au chambre sans ventilation nocturne.
- L'effet de la vitesse du vent favorise l'accélération de l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur.

Donc on peut conclure que la ventilation nocturne a un effet important sur la performance de l'inertie thermique pendant nuits d'été. Elle décharge la masse de la chambre de la chaleur excédentaire emmagasinée par le biais de l'inertie du mur pendant la journée en l'évacuant vers l'extérieur et en même temps de rafraîchir la structure par l'effet de convection afin de diminuer les températures intérieures diurnes.

04

SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE 04



Introduction

« L'informatique, en architecture, est apprise en tant qu'outil de représentation et de Communication du projet »¹

(A. Chatelet et al.,1998) déclarent que « pour l'architecte, la simulation doit permettre de valider rapidement des options fondamentales, d'explorer et de commencer à optimiser certains choix...pour un meilleur confort et des charges de fonctionnement moindre ».

L'outil informatique est un élément permettant de calculer, maîtriser les données qu'on lui donne mais surtout s'en imprégner afin d'en faire du projet. (Bastien Queyreire, Julie Randriamose ,2016)

La simulation numérique est devenue un moyen efficace et fiable, elle occupe une place très importante dans la conception de tout projet. Elle nous permet aujourd'hui un degré de précision et de réalisme jamais atteint auparavant.²

Dans ce chapitre, et afin de valider et vérifier les résultats obtenus dans la campagne de mesures qu'on a présentées dans le chapitre précédent, nous avons choisi l'évaluation numérique par l'outil informatique « **EnergyPlus** » version 8.4.0 pour les divers avantages qu'il présente.

IV.1- Choix d'outil de simulation

Energy Plus est l'outil choisi pour notre évaluation numérique. Le choix de ce programme découle de ses facteurs suggérés par l'ASHRAE (1997) tels que ; la précision, sensibilité, vitesse et cout, facilité d'usage, reproductibilité, qualité des données livrées, et disponibilité des données météorologiques. Energy Plus, et d'après une étude de caractéristiques des outils de simulation menés par (Crawley et al.,2008) est considéré comme un des logiciels les plus performants, et qui présente une fiabilité des résultats considérables, avec une actualisation permanente de logiciel (chaque 6 mois).

¹ Caroline Lecourtois.(2008) « Séminaire international sur l'architecture et le développement durable, université de Biskra, Article : Enseigner la conception architecturale assistée par ordinateur , thème 4, p : 473»

² Bastien Queyreire Julie Randriamose.(2016) «La Simulation dans la Conception Architecturale».

IV.2- Présentation de l'outil « Energyplus »

IV.2.1- Description de l'outil « Energyplus »

EnergyPlus, a été développé par le DOE³ des EtatsUnis et le laboratoire de Berkeley. La première version stable date de 2001, actuellement nous sommes à la version **8.8.0**. EnergyPlus est un outil de simulation énergétique des bâtiments que les ingénieurs, architectes et chercheurs utilisent pour estimer et optimiser la consommation d'énergie et d'eau des bâtiments. Le travail de modélisation a été réalisé avec ce moteur de calcul car il est « open source » et il intègre toutes les recherches réalisées pendant les 40 dernières années aux Etats-Unis et dans le monde entier (Oscar Hernandez Wilches ,2014). La validation de cet outil a fait l'objet d'une publication réalisée par l'ASHRAE (ASHRAE, 2011).



Figure IV.1: vue sur la fenêtre de logiciel EnergyPlus.

[www.energyplus.net]

EnergyPlus est un nouveau programme de simulation de la performance du bâtiment qui combine les meilleures capacités et fonctionnalités de BLAST et DOE-2 ainsi que de nouvelles capacités. EnergyPlus comprend complètement nouveau code écrit en Fortran 90.⁴

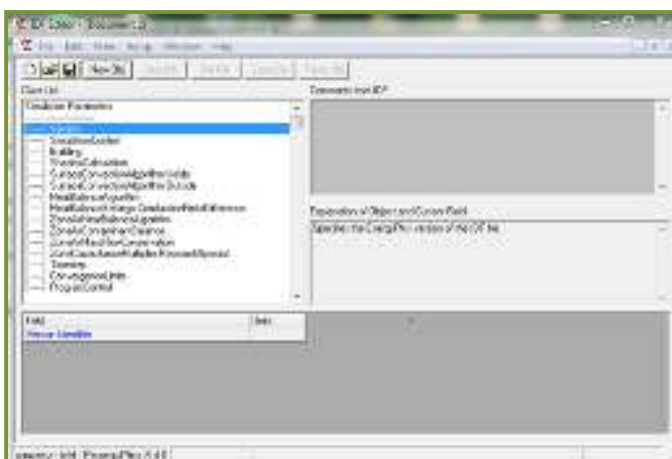


Figure IV.2: L'interface du logiciel EnergyPlus.

[Auteur]

³ DOE : Département d' Energie des EtatsUnis

⁴ D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann et C.O. Pedersen. (2000) « EnergyPlus: Energy Simulation program .ASHRAE Journal 42, 49-56»

Il contient un nombre considérable de fonctionnalité innovante, y compris Les étapes sous-horaires à temps, des systèmes HVAC modulaire configurable par l'utilisateur intégrés avec une simulation de zone de chaleur et masse. Ainsi que des structures de données d'entrée et de sortie qui peuvent faciliter le développement des modules et interfaces tiers. (Hema Sree Rallapalli, 2010)

IV.2.2- Structure de l'outil « Energyplus »

La figure (IV.3) montre la structure générale du programme .EnergyPlus a trois éléments de base: un gestionnaire de simulation, un module de simulation du bilan thermique, et un module de simulation des systèmes de bâtiment. Le gestionnaire de simulation contrôle l'ensemble de processus de simulation. Le module de simulation du bilan thermique calcule les charges thermiques et de masse. Et le module de simulation des systèmes de bâtiment contrôle la communication entre le moteur de bilan thermique et les systèmes de CVC et de boucles d'air et de leur composants attachés (bobines, chaudières, refroidisseurs, pompes, ventilateurs, etc.)(D.B. Crawley et al.,2000).

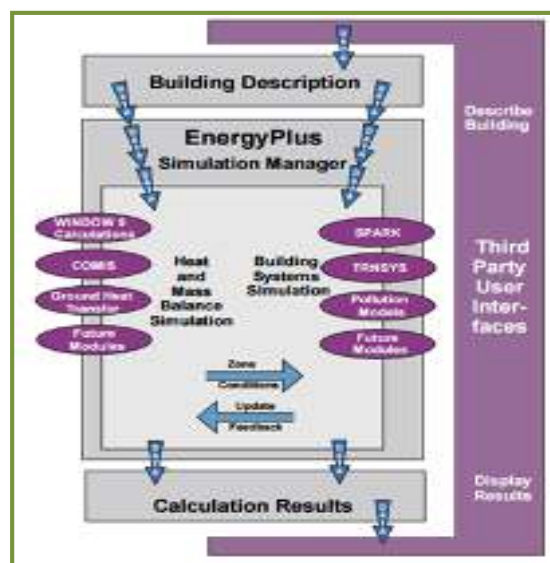


Figure IV.3: Structure du logiciel Energyplus. [D.B. Crawley et al.,2000]

IV.2.3-Avantages de l'outil « Energyplus »

Les principales caractéristiques de ce moteur de calcul sont :

- Une simulation intégrée. La réponse fournie par le bâtiment est étroitement couplée avec les systèmes primaires et secondaires.
- Possibilité de définir le temps de simulation inférieure à une heure.

- Les fichiers météo ainsi que l'outil sont basés sur des fichiers ASCII.
- Le calcul simultané des effets de convection et rayonnement.
- Les flux transitoires de chaleur à travers des éléments de construction tels que les murs, les toits, les planchers, etc. utilisent les fonctions de transfert de conduction.
- La modélisation du transfert de la chaleur du sol se base sur les différences finies en trois dimensions et des techniques analytiques simplifiées.
- Humidité et chaleur combinée est un modèle de transfert de masse qui tient compte de l'humidité d'adsorption / désorption soit comme une intégration couche par couche dans les fonctions de transfert de conduction ou en tant que modèle de la profondeur de pénétration de l'humidité effective (EMPD).
- Intégration des modèles de confort thermique, Fanger, KSU, Pierce, adaptatif.
- Intégration du modèle de ciel anisotrope pour améliorer le calcul de l'énergie solaire diffus sur des surfaces inclinées.
- Calculs des compositions des vitrages complexes ainsi que des protections solaires, tels que des stores contrôlables, de vitrages électrochromes.
- Calcul de l'éclairage intérieur ainsi que du risque d'éblouissement.

L'avantage le plus intéressant qui fait que soit l'outil le plus téléchargé au monde, plus de 85000 copies du logiciel ont été téléchargées depuis Avril 2001, c'est sa gratuité et son code est open-source(Oscar Hernandez Wilches ,2014).

IV.3-Présentation de l'interface

IV.3.1- Description

Open Studio® est une multi plate-forme de logiciels qui permet de simuler une modélisation du bâtiment. Il fonctionne avec le moteur de calcul EnergyPlus et fait également appel à d'autres logiciels comme Radiance (éclairage), Window (fenêtres), etc.

Le logiciel permet d'étudier tant les aspects énergétiques (bilan, déperdition, besoins, etc..) que les aspects liés à l'éclairage ou au dimensionnement des installations. Il utilise un plug-in Sketch up qui permet une modélisation géométrique aisée.⁵

⁵ Emmanuel's Heeren « Formation Bâtiment Durable Energie, Bruxelles Environnement : les logiciels utilisés dans le cadre de développement de projets passifs ou «très basse énergie» : Introduction ».

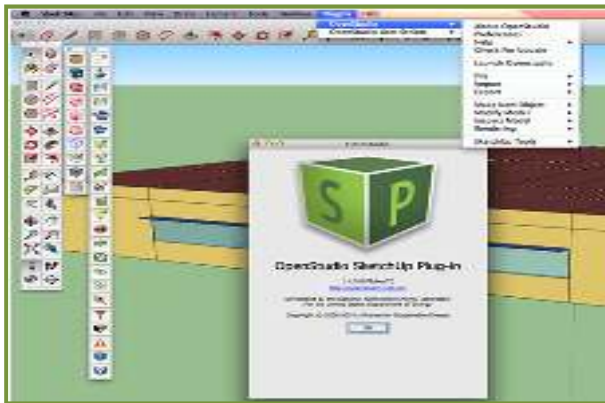


Figure IV.4: Interface du sketchup. [http://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/reference/sketchup_plugin_interface/]

Open Studio plug-in pour Google SketchUp, est une autre interface de l'EnergyPlus qui a été créée par le laboratoire national américain des énergies renouvelables. Département d'énergie, qui permet aux utilisateurs de créer et de modifier la géométrie des bâtiments pour les fichiers d'entrées du logiciel EnergyPlus. Ce plug-in gratuit permet aussi aux utilisateurs de lancer les simulations et de voir les résultats tout en restant sur le logiciel Google SketchUp 3D. Le plug-in ajoute les capacités de simulation énergétique des bâtiments de EnergyPlus à l'environnement de SketchUp. Ce qui va permettre de lancer une simulation de EnergyPlus du modèle qu'ils travaillent sur et voir les résultats toujours en restant sur le logiciel SketchUp.⁶

Nous avons utilisé OpenStudio un Plugin développé pour SketchUp. Ce plugin, gratuit, permet également de lancer des simulations et de visualiser les résultats sans quitter le programme de dessin de SketchUp 3D.

IV.3.2- Données introduites

- La géométrie du bâtiment - Plug-in Sktech Up !
- Les gains internes.
- Les typologies des parois (U, inertie, orientations, etc.).
- Les scénarios d'utilisation et d'occupation.
- La consigne de T°.
- Définition des zones climatiques.
- Définition du climat extérieur.
- Systèmes présents dans le bâtiment

⁶ Hema Sree Rallapalli.(2010). «A Comparison of EnergyPlus and eQUEST Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building»

Les fonctionnalités de Open Studio plug-in inclus la possibilité de (Hema Sree Rallapalli, 2010) :

- Création et modification des zones et surfaces sur Energy Plus.
- Lancement de Energy Plus et visualisation les résultats sans avoir quitté l'environnement SketchUp.
- Correspondre les conditions de limites de la surface entre les zones.
- Lancement de la recherche dans les surfaces et sous surfaces par le nom d'objet.
- L'ajout des gains interne et model de l'air externe pour le calcul de la charge.
- L'ajout d'un système CVC idéal pour le calcul de la charge.
- Définir et modifier les constructions crée par défaut.
- L'ajout des contrôles d'éclairage naturel et carte luminance.

IV.4- Objectifs de la simulation

Dans le cadre de notre étude la simulation présente une méthode complémentaire de celle de la campagne de mesures. Cette évaluation consiste à optimiser la conception de la fenêtre dans l'optique de minimiser cet apport en période chaude, On s'est limité à l'évaluation de la température de l'air dans l'espace chambre.

La modélisation de l'espace chambre repose sur un modèle réel qui est l'objet d'étude de la campagne de mesure décrit précédemment dans (le chapitre III).

La simulation est réalisée sous un ciel clair, pour le jour du 14 juillet 2016, qui est un jour représentatif des conditions climatiques estivales réelles de l'environnement extérieur de la ville de Laghouat. C'est aussi dans un objectif de définir un modèle pour le rendement optimal de ce dispositif passif, que plusieurs simulations sont entreprises.

Les dimensions du bâtiment ainsi que les formes géométriques ont été modélisées grâce à OpenStudio et google sketchup qui permettent une modélisation en 3D.

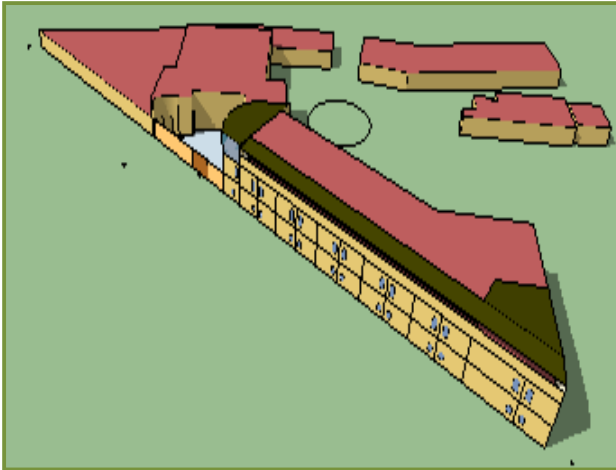


Figure IV.5: Le cas d' étude modélisé avec sketch up 16. [Auteur]

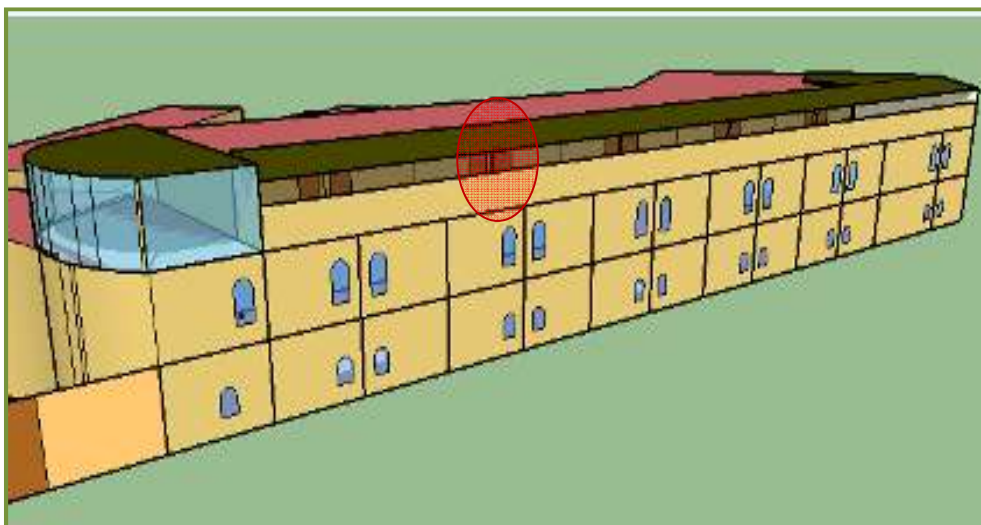


Figure IV.6: Chambres (A) et (B) modélisées avec sketch up 16. [Auteur]

IV.5- Déroulement de la simulation

Le déroulement de l'évaluation numérique à l'aide du logiciel « **EnergyPlus** » a pris comme cheminement :

- **La première phase** concerne l'introduction des paramètres du site et du climat de la région de Laghouat ; les paramètres thermiques des matériaux de construction. Ensuite les valeurs horaires des températures pour les périodes d'été. Ainsi que les scénarios d'occupation de l'espace.
- **La seconde phase** vise de trouver la meilleure configuration de la fenêtre, elle démarre du cas réel. Ainsi que l'amélioration du rendement de la fenêtre à travers les paramètres suivants :
 - ✓ Dimension de la fenêtre.
 - ✓ Orientation de la fenêtre.

- ✓ Hauteur sous-plafond de la chambre
 - ✓ Type de vitrage.
 - ✓ Type de ventilation « traversante ».
 - ✓ Vitesse du vent.
- **La dernière phase**, c'est la lecture des résultats de la simulation par le biais du logiciel Excel.

IV.6- L'évaluation numérique

Etant donné l'objectif de notre recherche qui est de définir un modèle pour le rendement optimal de la fenêtre, notre étude concerne de façon fondamentale les variables de base qui présente le cas d'étude initial de la chambre. Les variables dépendantes présentent les améliorations du rendement de la fenêtre à travers différents paramètres (dimension de la fenêtre, orientation des fenêtres, hauteur sous-plafond de la chambre, type de vitrage, type de ventilation « traversante » et vitesse du vent) et leur effet sur les performances de l'espace concerné (chambre).

IV.6.1- Analyse du modèle de référence

La simulation est faite sur les deux chambres (A) et (B) avec et sans ventilation naturelle nocturne. Le jour choisi est le 14 juillet, le vent a soufflé principalement du sud ouest, avec une vitesse moyenne de 0.38 m/s.

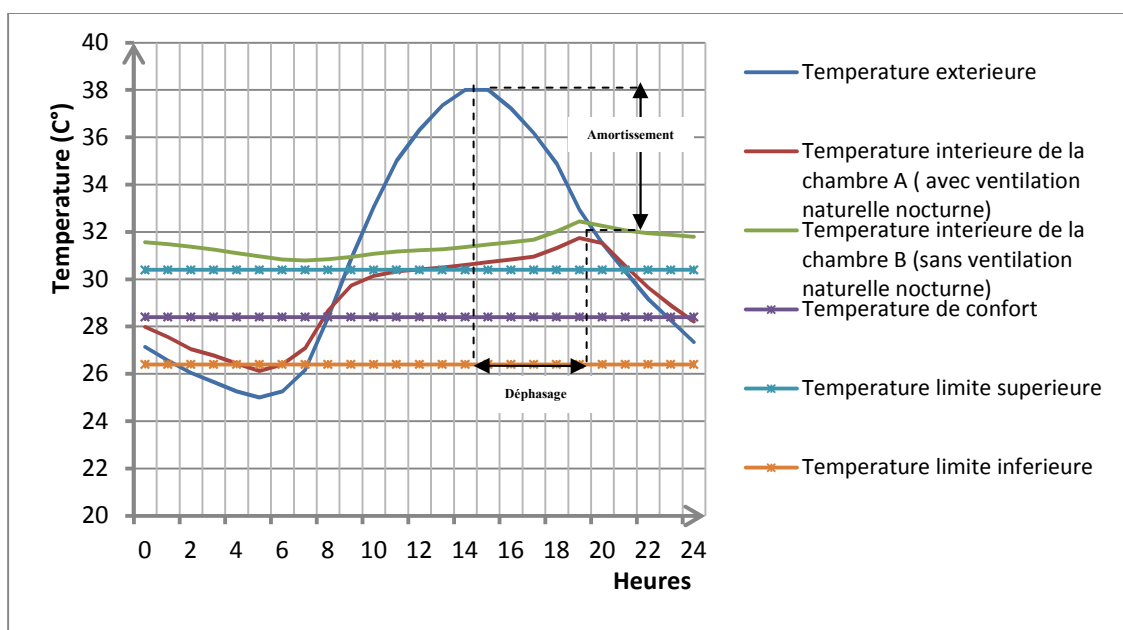


Figure IV.7: Comparaison des températures intérieures simulées pour la chambre A et B (avec et sans ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

Les courbes de la figure IV.7 présentent une comparaison entre la température de l'air intérieur simulée dans les deux chambres (A) et (B) avec et sans ventilation naturelle nocturne. La lecture générale des oscillations de températures fait ressortir que la température de l'air intérieur de la chambre (B), sans ventilation naturelle nocturne varie très peu tout au long de la journée. Où la différence entre la température maximale 32.44 C° et la température minimale 30.79 C° est faible, soit une amplitude de 1.65 C° . Alors que celle de la température de l'air intérieure de la chambre (A), avec ventilation naturelle nocturne varie entre une valeur minimale 26.13C° (à 05h00) et une valeur maximale 31.74C° (à 19h00), soit une amplitude de 5.61 C° .

Le facteur d'amortissement atteint dans la chambre (B) est de 0.12 (rapport de l'amplitude de la variation de « T_i » sur l'amplitude de la variation de « T_e »), avec une amplitude de 5.56°C entre la température intérieure et la température extérieure. La température extérieure maximale de 38°C atteint à 14h a été d'une part écrasée d'où la maximale intérieure uniquement de 32.44° , et déphasée après quatre heures de temps. Alors que le facteur d'amortissement atteint dans la chambre (A) est de 0.43, avec une amplitude de 6.26°C entre la température intérieure et la température extérieure. La température extérieure maximale de 38°C atteint à 14h a été d'une part écrasée d'où la maximale intérieure uniquement de 31.74° , et déphasée après quatre heures de temps.

On remarque aussi que la ventilation nocturne de 21h à 06h dans la chambre (A) peut diminuer la température de l'air intérieure pendant la journée de 0.7 C° à 3.71 C° comparée celle dans la chambre (B).

La figure IV.8 montre une comparaison entre la température intérieure mesurée et celle simulée dans la chambre (B) sans ventilation naturelle nocturne. On peut observer que les courbes des températures d'air intérieure mesurées, et celle simulées par le logiciel « Energyplus » se comportent de façon analogue, avec un écart maximal de 1.31°C . Il peut être expliqué dans ce cas par :

- La vitesse du vent, dans la simulation elle est considérée constante pendant toute la journée, mais en réalité celle-ci est variable.
- Les caractéristiques thermo-physiques (Conductivité λ , Densité ρ , capacité thermique spécifique c) introduites dans la simulation ne sont pas déterminées avec précision (référence bibliographique).

Les deux courbes de la température intérieure mesurée et celle simulée dans la chambre (B) se rapprochent en période nocturne.

On constate aussi que la température intérieure de la chambre B (sans ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la température de la zone de confort établie d'après la température neutre de Humphrey. Cette zone est comprise entre la limite supérieure de 30.4°C et la limite inférieure de 26.4°C pour la période estivale (Voir annexe I).

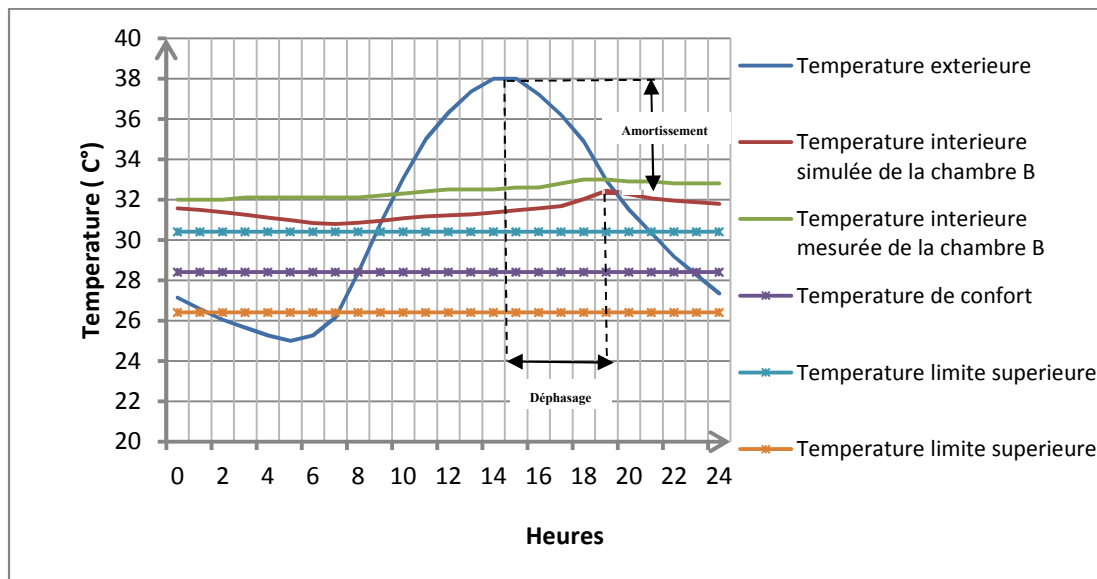


Figure IV.8: Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la chambre B (sans ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

La figure IV.9 compare la température intérieure mesurée avec celle simulée dans la chambre (A) avec ventilation naturelle nocturne. Pour assurer la ventilation nocturne la fenêtre et la porte fenêtre (sur le mur nord-ouest) de la chambre (A) seront ouvert dès que la température de l'air intérieure devient supérieure ou égale la température de l'air extérieure (du 21 h du soir jusqu'au 6 h du matin). La ventilation nocturne participe à décharger la chaleur due aux apports solaires et internes emmagasinée dans la masse de la chambre durant le jour et en même temps de rafraîchir la structure par l'effet de convection pendant la nuit. Afin de diminuer les températures intérieures du jour suivant par la fraîcheur emmagasinée dans la masse.

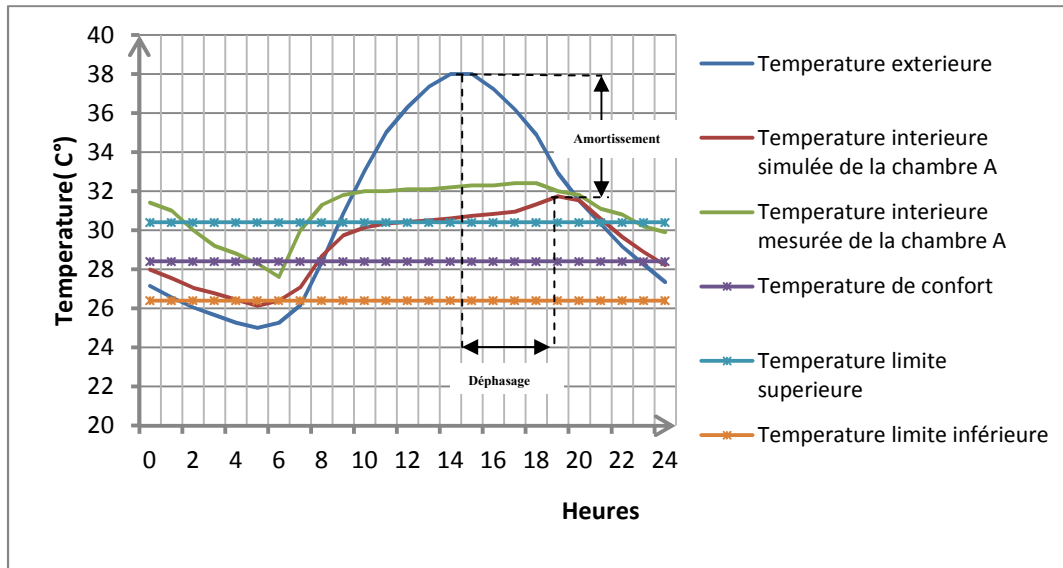


Figure IV.9: Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la chambre A (avec ventilation nocturne) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

D'après les résultats de la comparaison, la température de l'air intérieur suit la même courbure dans les deux cas (mesurée et simulée par le logiciel « Energyplus »). On constate aussi que les températures intérieures obtenues par la simulation sont inférieures à celle mesurées. Ces écarts surviennent pendant la période de surchauffe diurne et de refroidissement nocturne, elles peuvent être expliqués dans ce cas par la vitesse du vent, dans la simulation elle est considérée constante pendant toute la journée, mais en réalité celle-ci est variable et par fois très variable entre le jour et la nuit.

De 00h à 08h les deux courbes de la température intérieure simulée de la chambre A et de l'air extérieure se rapprochent en période nocturne. Ceci revient à l'effet de la ventilation, par contre de 9h à 21h on remarque que la température intérieure varie et atteint son maximum à 19h (31,74°C). Après 19h (coucher de soleil) les températures diminuent graduellement jusqu'à la température intérieure de la chambre devient supérieure ou égale à la température de l'air extérieure à 21h.

On voit aussi que :

- De 00h00 à 11h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort.
- De 14h00 à 21h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la limite supérieure de confort.

- De 21h00 à 24h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort.

IV.6.2- Analyse des stratégies d' amélioration

Afin d'aboutir aux meilleurs résultats pour améliorer le rendement thermique de la fenêtre, plusieurs paramètres ont été évalués tel que : La dimension de la fenêtre, l'orientation de la fenêtre, le type du vitrage, la hauteur sous plafond et la vitesse du vent.

IV.6.2-1-Le 1^{er} scénario : Les différents rapports WWR (10%,25%,50% et 75%)

Des simulations ont été effectuées pour observer l'impact de la dimension de la fenêtre sur la température intérieure dans la chambre. Nous avons étudié quatre différents rapports WWR (10%, 25%, 50% et 75%) avec le rapport du cas existant (38%). La configuration initiale de la chambre est gardée la même, sans le changement des autres paramètres (orientation, hauteur de la chambre...).

Durant la période diurne, nous pouvons observer que la température de l'air intérieur augmente respectivement avec l'augmentation du rapport WWR (10%, 25%,38%, 50% et 75%) et cela dus au gain de chaleur à travers les vitrages (la conductivité thermique $W/(m^2.K)$ est plus élevée dans les plus grandes fenêtres), ce résultat rejoint celui de (JL.IZARD, 1993) qui affirme que l'augmentation de la surface vitrée a toujours pour effet une augmentation de la température interne diurne. Par contre l'effet positif de l' augmentation du rapport WWR est surtout perçu durant la période nocturne. Ce ci s'explique par la performance de ventilation naturelle est meilleure avec une fenêtre plus grande, elle permet de fournir un débit de ventilation plus élevé qui est également important pour le refroidissement nocturne de la chambre. (Figure IV-10)

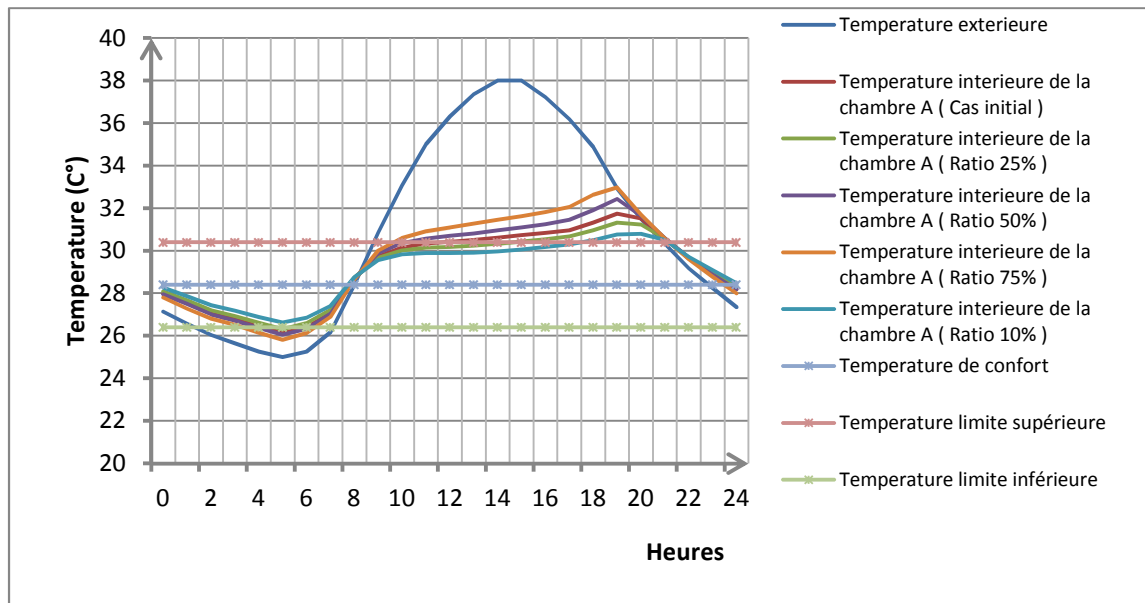


Figure IV-10: Variation de la température intérieure simulée avec des ouvertures de différents rapports WWR [Période estivale, journée du 14-07-2016]

Le rapport WWR de 10% donne le meilleur résultat avec un minimum de température de 26,62 C° atteint à 05h et un maximum de 30,76 C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 4,14 C°. Le rapport WWR de 25% enregistre une température minimale de 26,31 C° atteint à 05h et un maximum de 31,32 C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 5,01 C°. Le rapport WWR de 38% (cas initial) enregistre une température minimale de 26,13 °C atteint à 05h et un maximum de 31,74 C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 5,61 C°. Le rapport WWR de 50% enregistre une température minimale de 26,05 C° à 05h et une température maximale de 32,43 C° à 19h, marquant une amplitude de 6,38 C°. Le rapport WWR de 75% donne le mauvais résultat avec un minimum de température de 25,81 C° à 05h et un maximum de 32,98 C° à 19h. Soit une amplitude de 7,17 C°. Ces résultats indiquent qu'une petite surface vitrée exposée au rayonnement solaire est bénéfique par rapport à une grande surface puisqu'elle reçoit une quantité minimale en été.

On voit aussi que :

- De 00h00 à 18h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort.
- De 19h00 à 21h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la limite supérieure de confort.
- De 21h00 à 24h00, la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort.

Donc on peut considérer que le rapport fenêtre -mur (WWR) de 10% est le plus optimal pour l'abaissement de la température intérieure en été.

IV.6.2-2-Le 2^{ème} scénario : Orientation de la fenêtre

L'évaluation de l'effet de l'orientation de la fenêtre sur la température intérieure a été établie par une comparaison entre l'orientation initial de la fenêtre (nord-ouest) et les quatre orientations (nord, sud, est et ouest). Cette comparaison a été répétée pour les rapports de la fenêtre -mur (WWR) suivants (10%, 25%, 38%, 50% et 75%).

Les figures (IV.11 ; IV.12; IV.13; IV.14 et IV.15) indiquent que l'orientation de la fenêtre est aussi un facteur principal qui a un impact important sur la variation de la température intérieure durant la période estivale. On constate que :

- Les résultats du rapport de la fenêtre au mur externe (WWR) de 10% sont les meilleurs dans les différentes orientations testées.
- Dans le cas où les fenêtres sont orientées au sud et au nord, la chambre enregistre des températures intérieures inférieures au cas des fenêtres orientées à l'est et à l'ouest, surtout quand il s'agit du rapport de la fenêtre - mur (WWR) de 10%.
- L'orientation optimale c'est l'orientation Sud avec un minimum de température de 26,6 C° atteint à 05h et un maximum de 30,45 C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 3.85 C°. Ce résultat rejoint celui de (IZARD. J.L, 2003) ; Qui dit que l'orientation Sud offre les apports solaires les plus faibles en été.
- L'orientation la plus défavorable est l'orientation Ouest avec un minimum de température de 26,66 C° atteint à 05h et un maximum de 31C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 4.34 C°. Puis l'orientation Est avec un minimum de température de 26,71 C° atteint à 05h et un maximum de 31,03C° atteint à 19h. Soit une amplitude de 4.32 C°.
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort toute la journée.

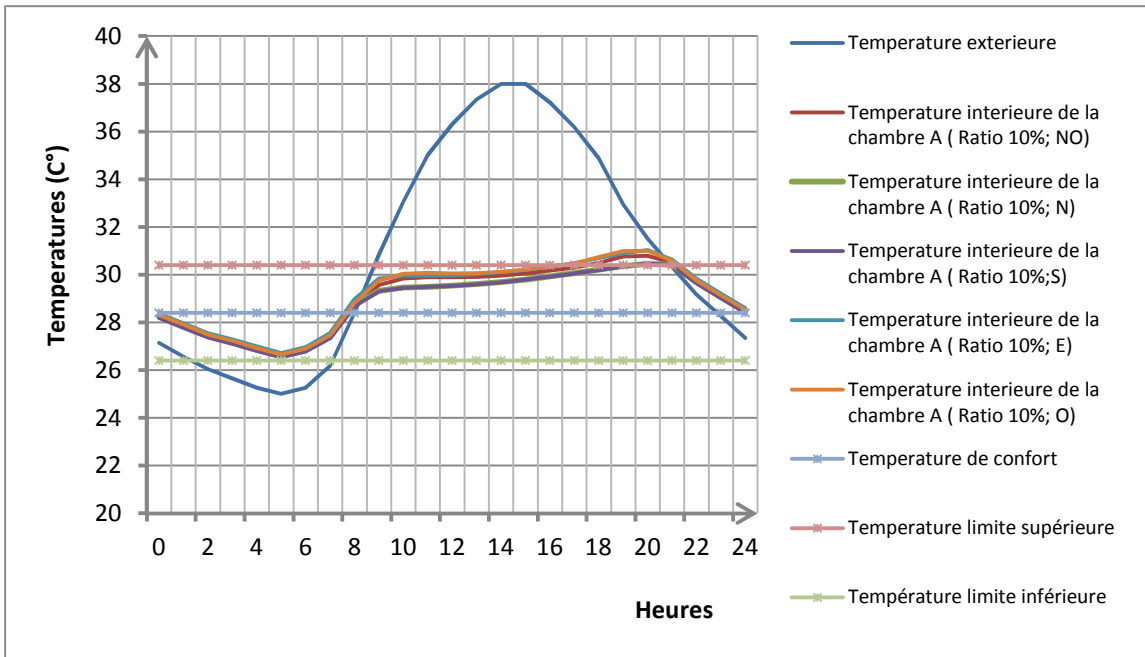


Figure IV-11: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% en changeant l'orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].

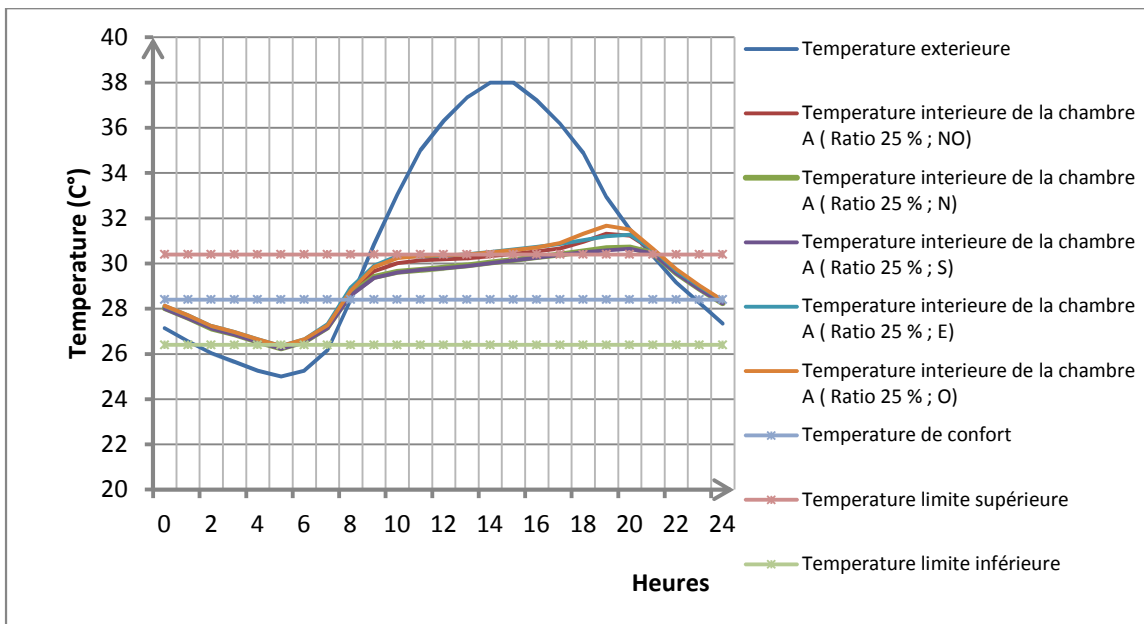


Figure IV-12: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25% en changeant l'orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].

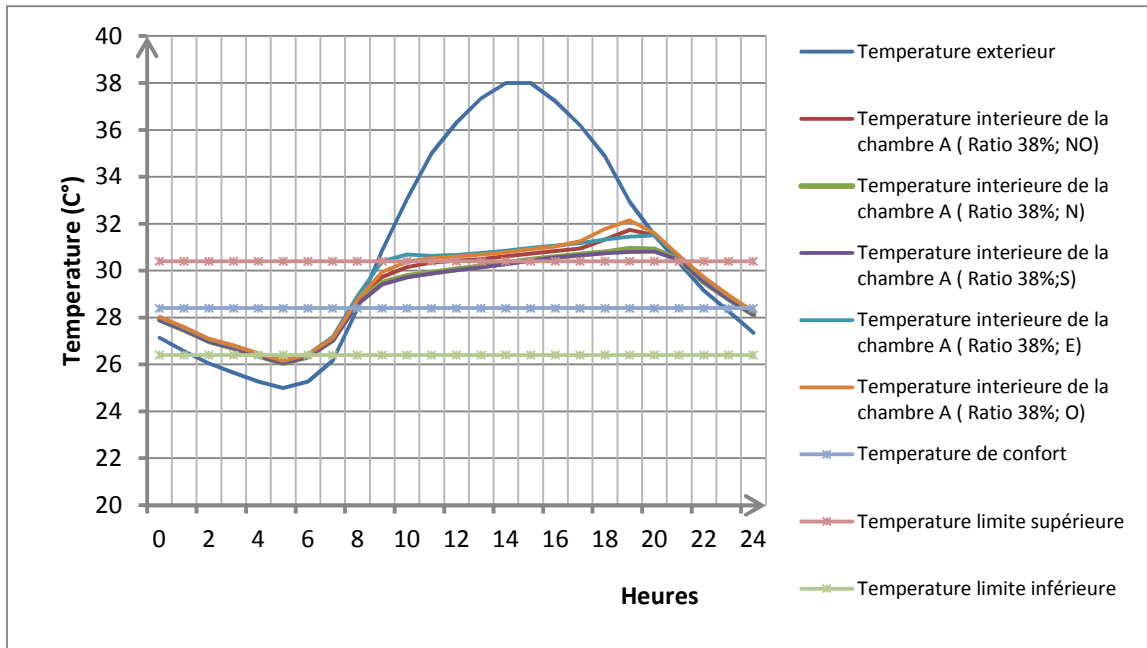


Figure IV-13: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38% en changeant l'orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].

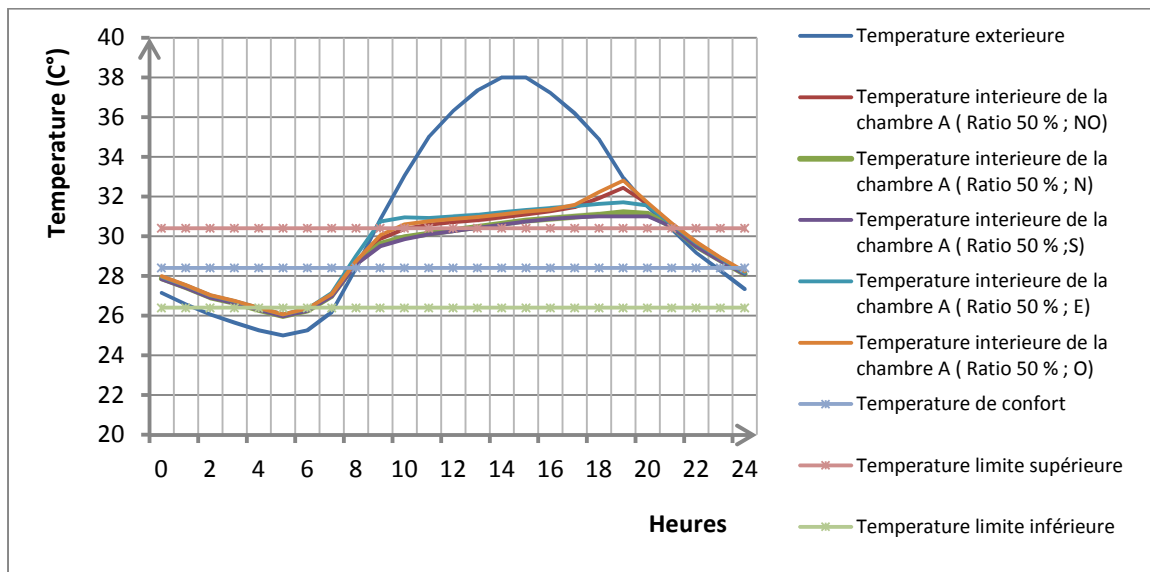


Figure IV-14: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50% en changeant l'orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].

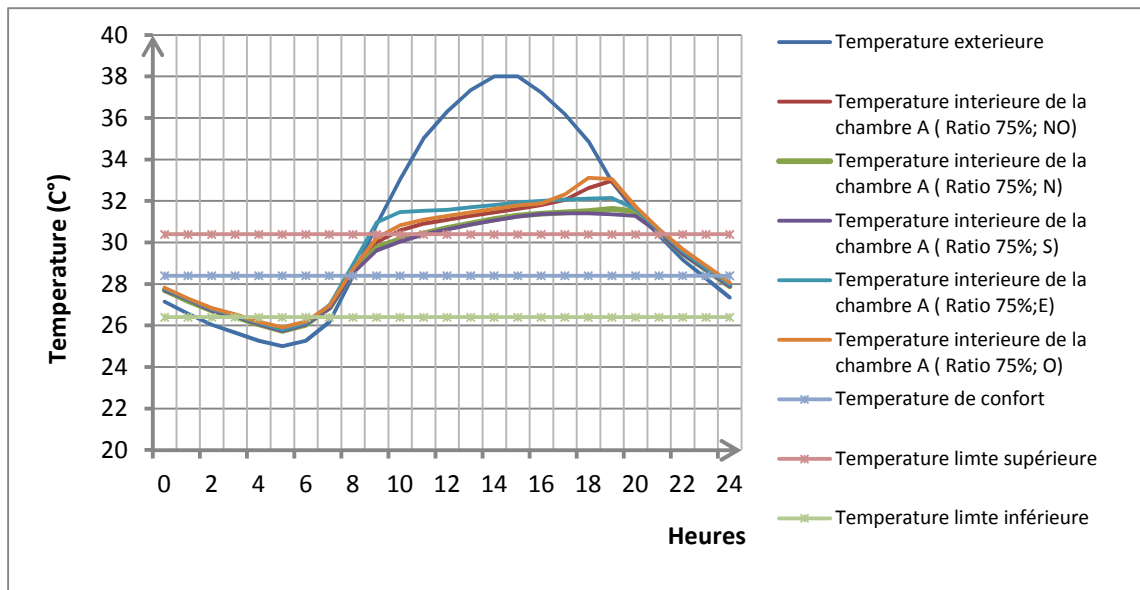


Figure IV-15: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75% en changeant l'orientation de la fenêtre [Période estivale, journée du 14-07-2016].

D'après les résultats des différents cas, on peut en conclure que l'orientation Sud de la fenêtre avec un rapport de la fenêtre au mur externe (WWR) de 10% est une bonne alternative, elle permet de diminuer la température de l'air intérieur tout en améliorant les conditions thermiques intérieures.

IV.6.2-3-Le 3^{ème} scénario : Hauteur sous plafond

En testant l'effet de la hauteur sous plafond de la chambre du cas conclue comme favorable où WWR 10% et l'orientation Sud. Trois hauteurs différentes ont été testées afin de constater les meilleures conditions qui pourraient affecter positivement la variation de la température intérieure. En gardant les mêmes autres paramètres de l'espace.

La première hauteur sous-plafond est la hauteur réglementaire nationale ($H=2.90\text{ m}$)⁷.

La deuxième hauteur sous-plafond est la hauteur réglementaire au niveau mondial après plusieurs recherches faites concernant ce paramètre ($H=2.40\text{ m}$)⁸.

⁷ La Direction Des Programmes D'habitat Et De La Promotion Immobilière. (Octobre 2007) « Le document de Prescriptions techniques et fonctionnelles applicables aux logements sociaux ».

⁸ « Ventilation, Building Regulations (2009), Page 11», «Building Code of the Philippines, Section 805» « National construction code , Volume two, Building Codes of Australia Class 1 and Class 10 Building»

La figure IV-16 montre que les trois hauteurs testées (2.40m, 2.55m et 2.90m) donnent des températures intérieures presque identiques de minuit à 16h00. Mais à partir de 17h jusqu'au 21h la hauteur de 2.90m offre des températures légèrement supérieures aux deux autres hauteurs.

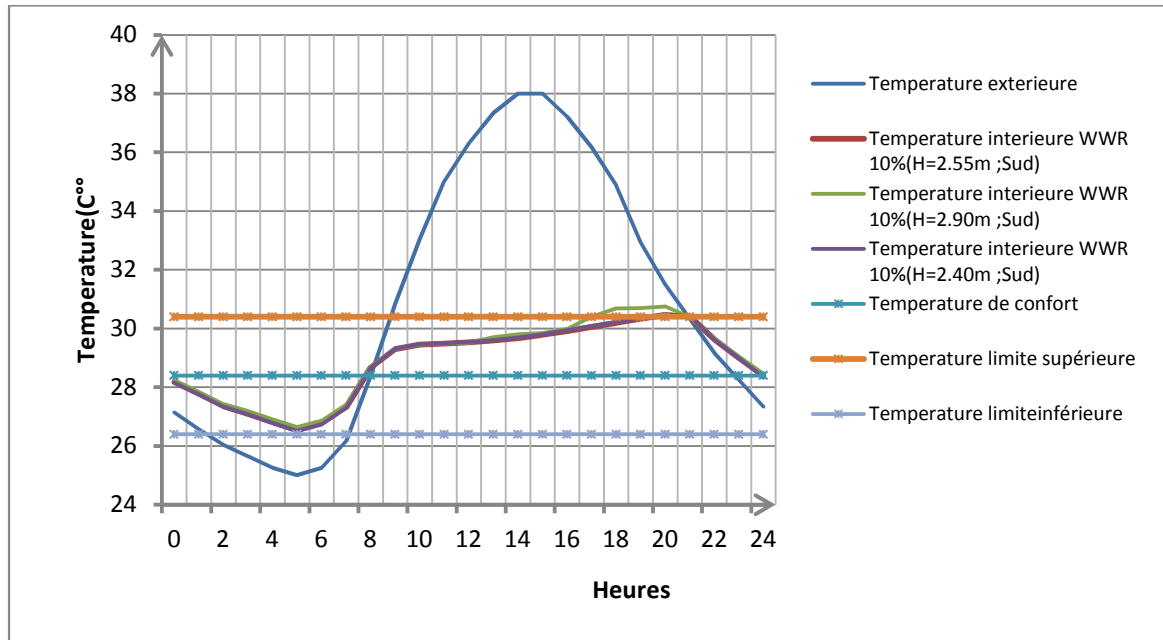


Figure IV-16: Variation de la température intérieure simulée avec différents hauteurs [Période estivale, journée du 14-07-2016]

Ce résultat nous permet de constater que l'impact de la hauteur sous-plafond n'est pas aussi important dans l'abaissement de la température intérieure que celui de l'orientation et la dimension de la fenêtre.

IV.6.2-4-Le 4^{ème} scénario : Le type du vitrage

Parmi les paramètres principaux de la fenêtre est le type du vitrage, Afin de savoir son influence sur la température intérieure, on va vérifier deux types du vitrage (Simple, Double), avec l'orientation Sud et le rapport WWR 10% du cas conclue comme favorable.

D'après les graphiques (IV-17, IV-18, IV-19, IV-20, IV-21) On peut observer que dans le cas où le rapport WWR est de 10%, les températures intérieures maximales et minimales pour les fenêtres à simple vitrage et à double vitrage sont respectivement de 30,46°C et 26.54°C, 30,43C et 26.54°C.

Dans le cas où le rapport WWR est de 25%, les températures intérieures maximales et minimales pour les fenêtres à simple vitrage et à double vitrage sont respectivement de 30,65C° et 26.24C°, 30,58C et 26,23C°. Dans le cas où le rapport WWR est de 38%, les températures intérieures maximales et minimales pour les fenêtres à simple vitrage et à double vitrage sont respectivement de 30,81C° et 26.06C°, 30,76C et 26. 05C°. Dans le cas où le rapport WWR est de 50%, les températures intérieures maximales et minimales pour les fenêtres à simple vitrage et à double vitrage sont respectivement de 31C° et 25.97C°, 30,85C et 25.96C°. Dans le cas où le rapport WWR est de 75%, les températures intérieures maximales et minimales pour les fenêtres à simple vitrage et à double vitrage sont respectivement de 31.36C° et 25.74C°, 31.15C et 25.73C°.

On constate aussi que :

- La réduction du rapport WWR peut diminuer l' effet du double vitrage.
- Lorsque le rapport WWR est petit (10%,25%,38%), le double vitrage donne des températures intérieures presque identiques avec celles du simple vitrage, en revanche dans les cas de grands rapports WWR (50%,75%), le double vitrage apporte également une faible amélioration pour la réduction des températures intérieures par rapport au simple vitrage. Donc l'impact du type de vitrage est plus faible en été puisque la fenêtre reçoit moins de rayonnement solaire direct, les rayons du soleil étant plus verticaux.
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort toute la journée pour le cas des rapports WWR 10% et 25%.En revanche dans les cas de grands rapports WWR (38%,50%,75%), la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure a la limite supérieure de confort de 15h00 a 21h00 pour les rapports WWR (38%,50%) et de 12h00 a 21h00 pour le rapport WWR (75%) .

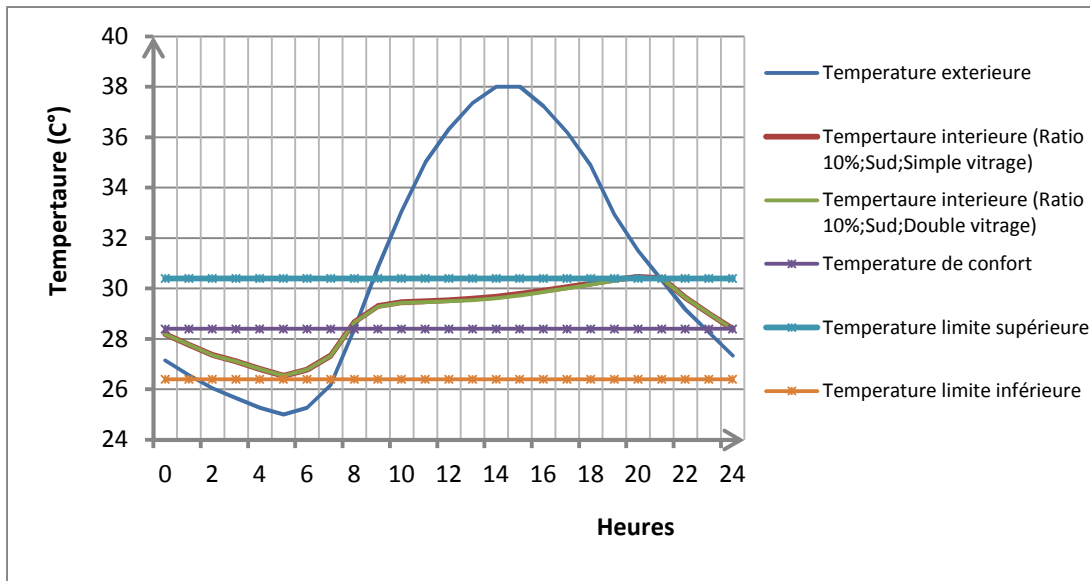


Figure IV-17: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% (Simple et double vitrage)[Période estivale, journée du 14-07-2016]

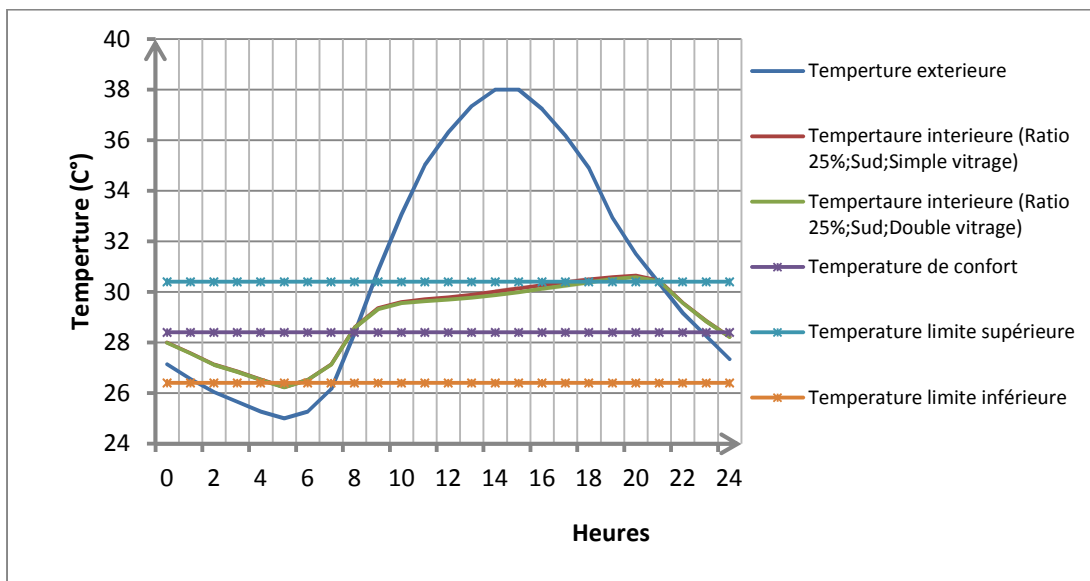


Figure IV-18: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25% (Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

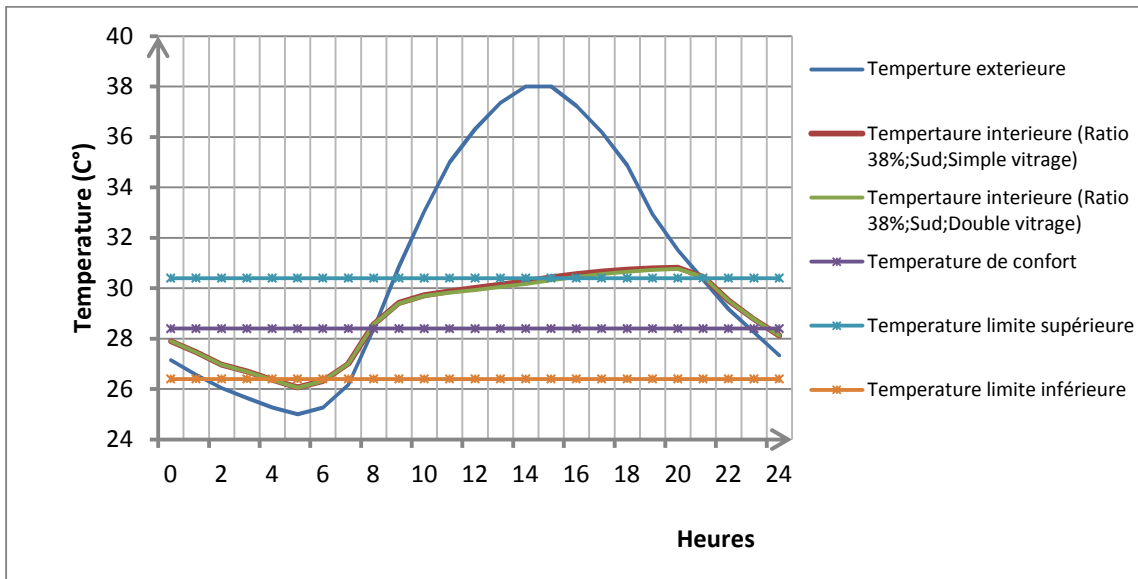


Figure IV-19: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38% (Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

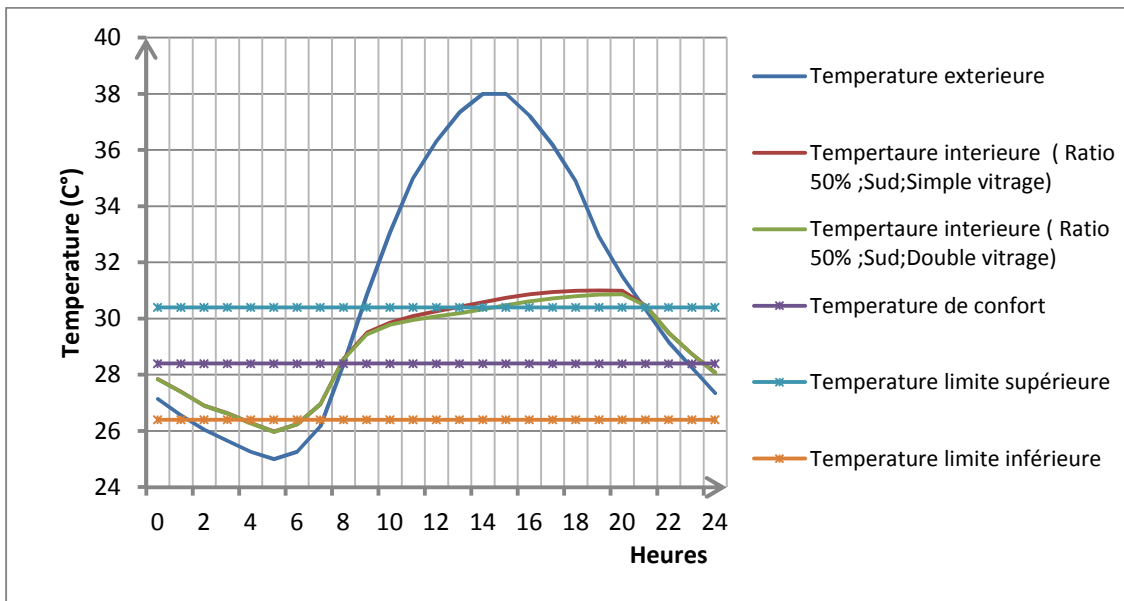


Figure IV-20: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50% (Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

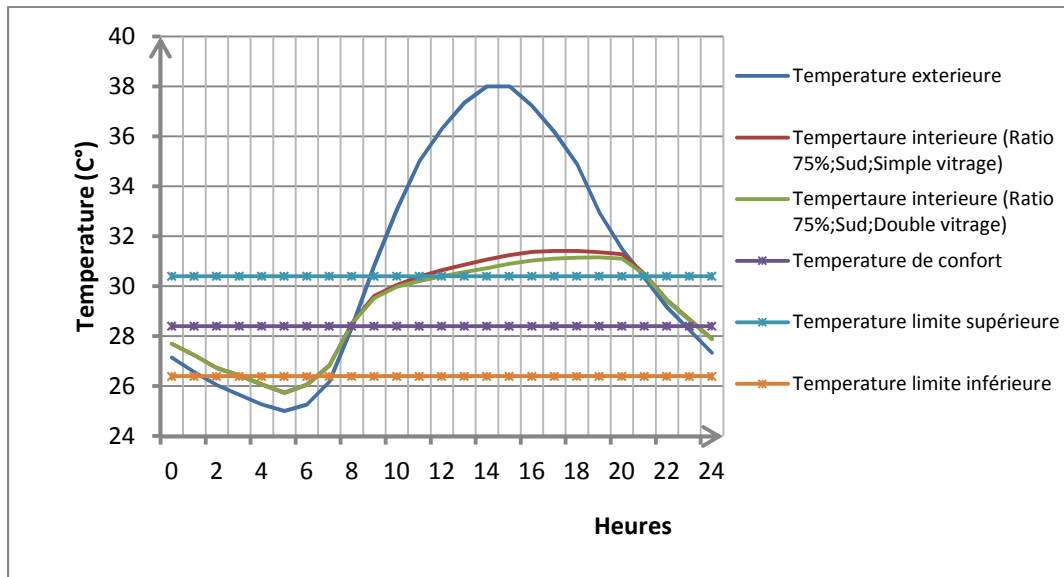


Figure IV-21: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75% (Simple et double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

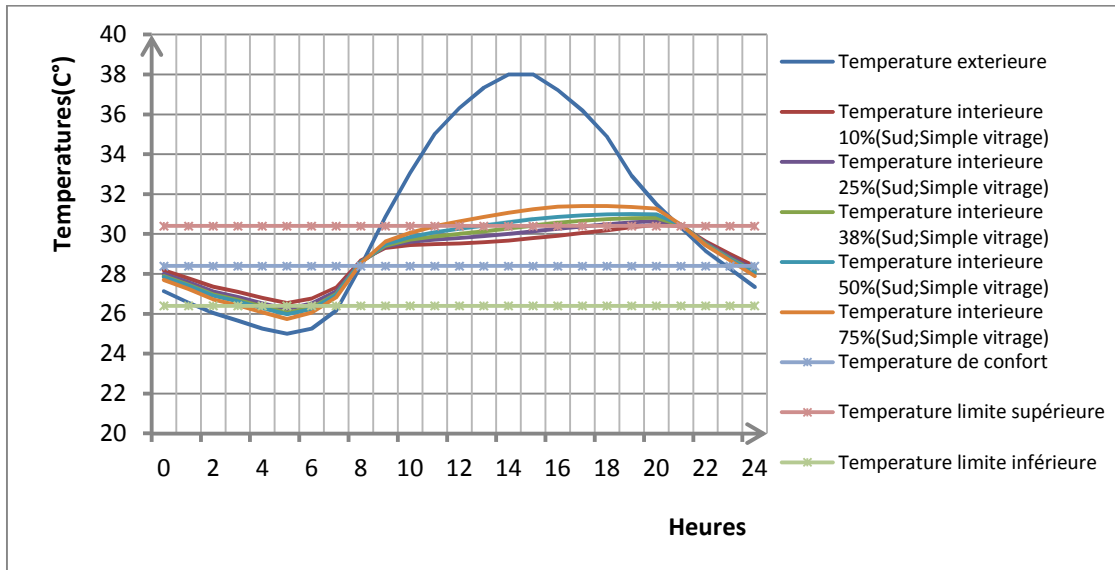


Figure IV-22: Variation de la température intérieure simulée avec différents rapports WWR (Simple vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

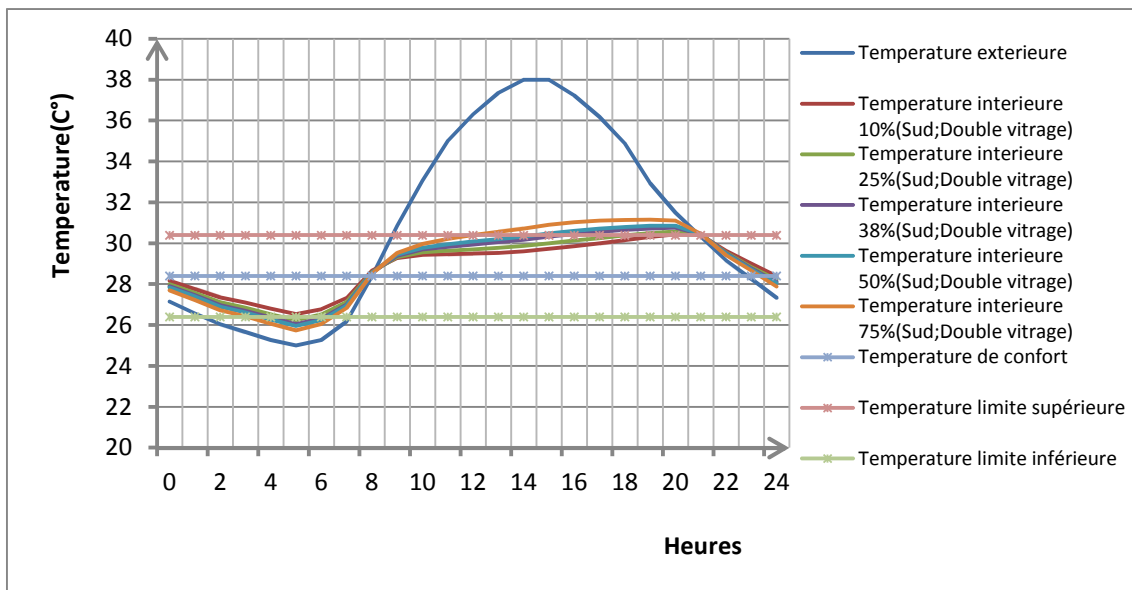


Figure IV-23: Variation de la température intérieure simulée avec différents rapports WWR (Double vitrage) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

On peut dire que l'impact du type de vitrage est plus faible en été puisque la fenêtre reçoit moins de rayonnement solaire direct, les rayons du soleil étant plus verticaux. Donc la modification de type de vitrage ne s'avère pas intéressante du point de vue thermique.

IV.6.2-5-Le 5^{ème} scénario : Type de ventilation (traversante)

Un autre cas a été élaboré afin d'étudier l'effet de la ventilation naturelle « Transversale », un phénomène généré par l'ouverture de la porte et la fenêtre (sur des façades différentes), les mouvements de l'air sont créés par les différences de pression dues au vent entre les façades.

D'après les graphiques (IV-24, IV-25, IV-26, IV-27, IV-28) On peut observer que :

- Le rapport WWR de 10% donne le meilleur résultat. Les températures intérieures maximales et minimales pour les deux cas de ventilation unilatérale et transversale sont respectivement de 30,46°C et 26,54°C (Soit une amplitude de 3,92°C), 30,36 et 25,33°C (Soit une amplitude de 5,03°C).

- Lorsque le rapport WWR est petit (10%), la ventilation transversale apporte également une amélioration importante pour la réduction des températures intérieures par rapport à la ventilation unilatérale de 00h00 à 11h00 et de 21h00 à 24h00.
- De 12h00 à 21h00, la ventilation transversale donne des températures intérieures presque identiques avec celles de la ventilation unilatérale.
- Dans les cas des autres rapports WWR (25%,38%,50%,), la ventilation transversale offre des températures intérieures légèrement inférieures par rapport à la ventilation unilatérale de minuit à 08h00 et de 21h00 à 24h00. En revanche dans le cas de rapport WWR (75 %) les profils des températures d'air interne dans les deux cas (ventilation unilatérale et transversale) suivent les mêmes allures.
- La température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est dans la zone confort toute la journée pour le cas des rapports WWR 10%. En revanche dans les cas des rapports WWR (25%,38%,50%,75%), la température intérieure de la chambre A (avec ventilation naturelle nocturne) est supérieure à la limite supérieure de confort de 18h00 à 21h00 pour le rapport WWR (25%), de 16h00 à 21h00 pour le rapport WWR (38%), de 14h00 à 21h00 pour le rapport WWR (50%) et de 12h00 à 21h00 pour le rapport WWR (75%) .

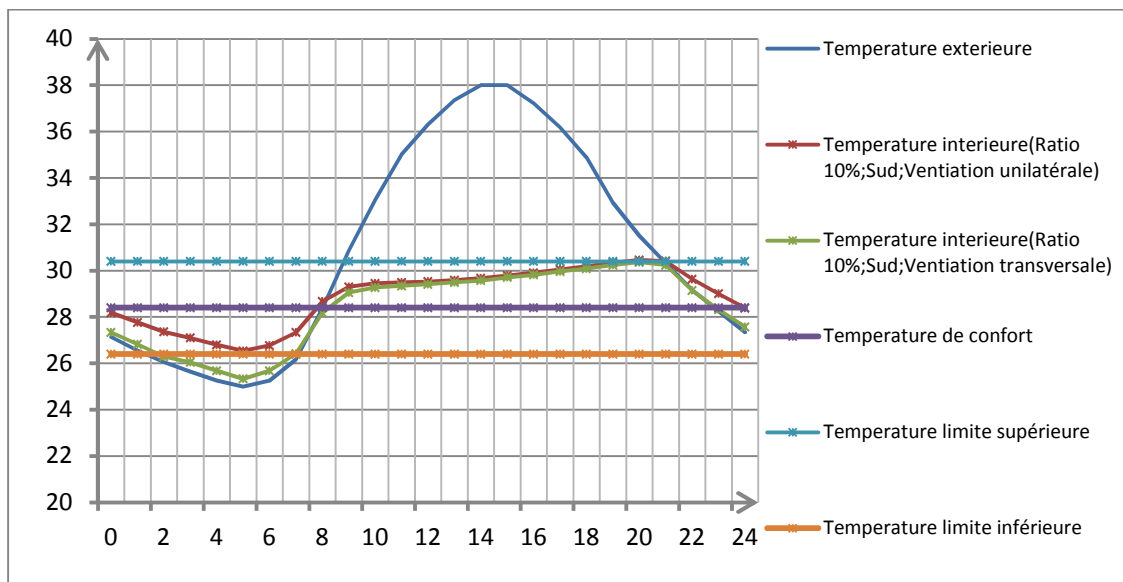


Figure IV-24: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 10% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

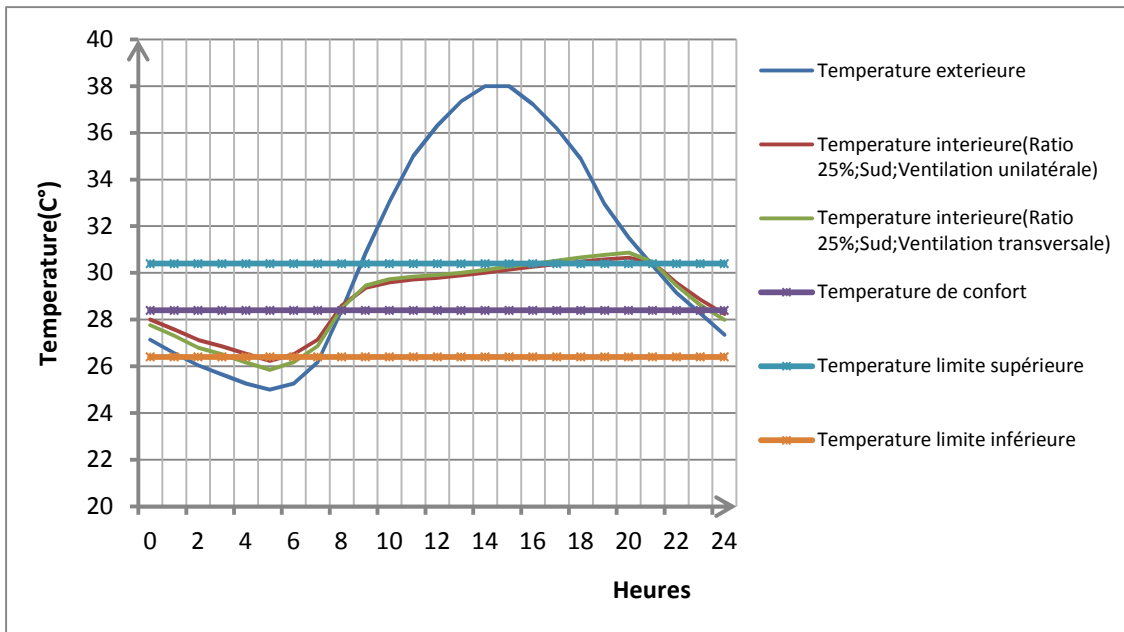


Figure IV-25: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 25% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

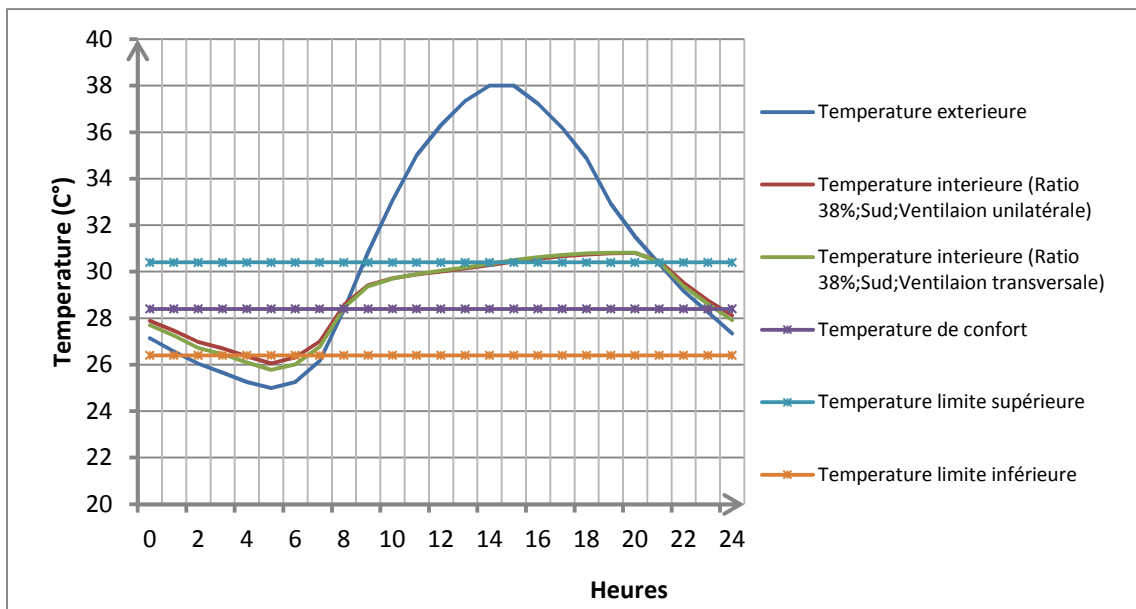


Figure IV-26: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 38% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

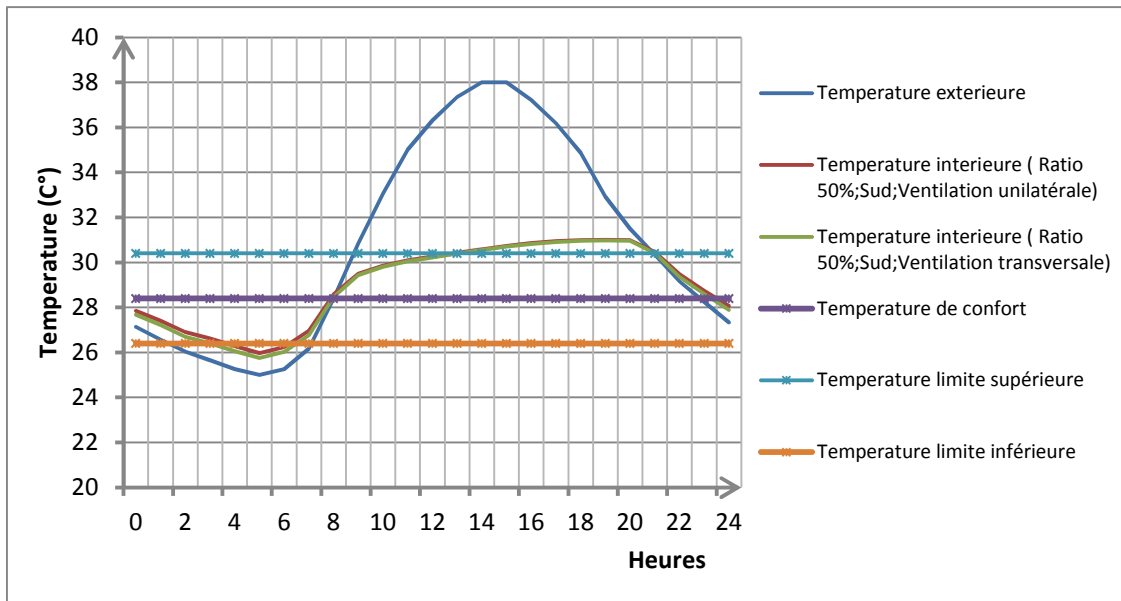


Figure IV-27: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 50% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

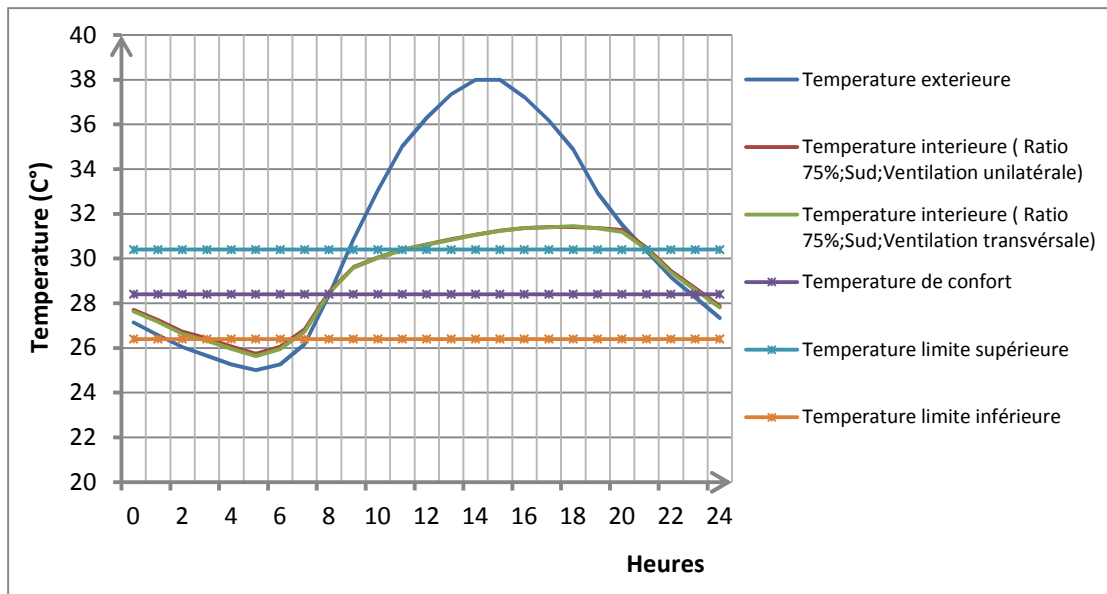


Figure IV-28: Variation de la température intérieure simulée avec un rapport WWR de 75% (Ventilation unilatérale et transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

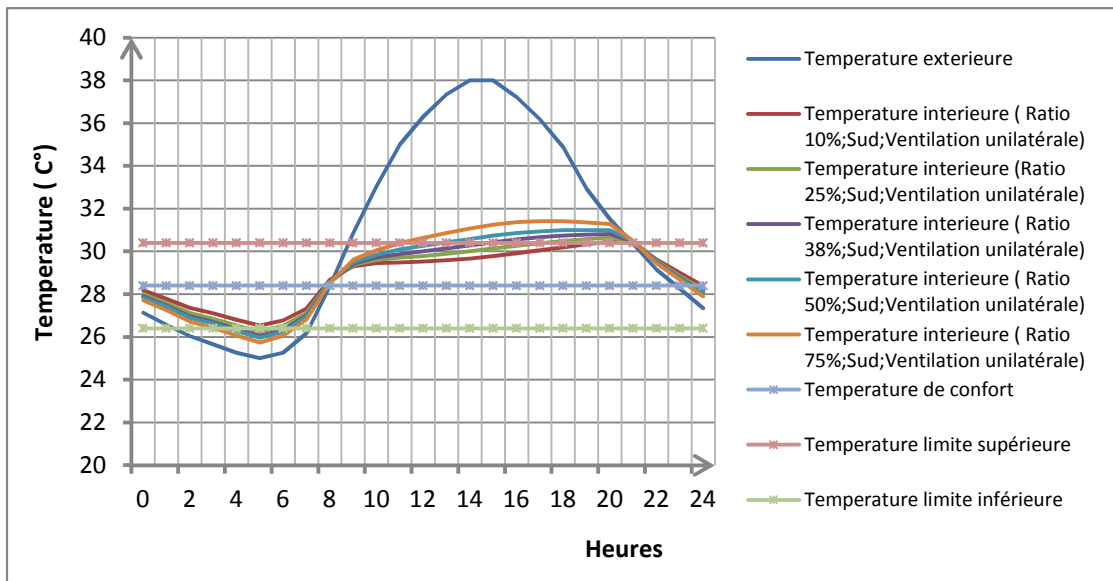


Figure IV-29: Variation de la température intérieure simulée avec différents rapport WWR (Ventilation unilatérale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

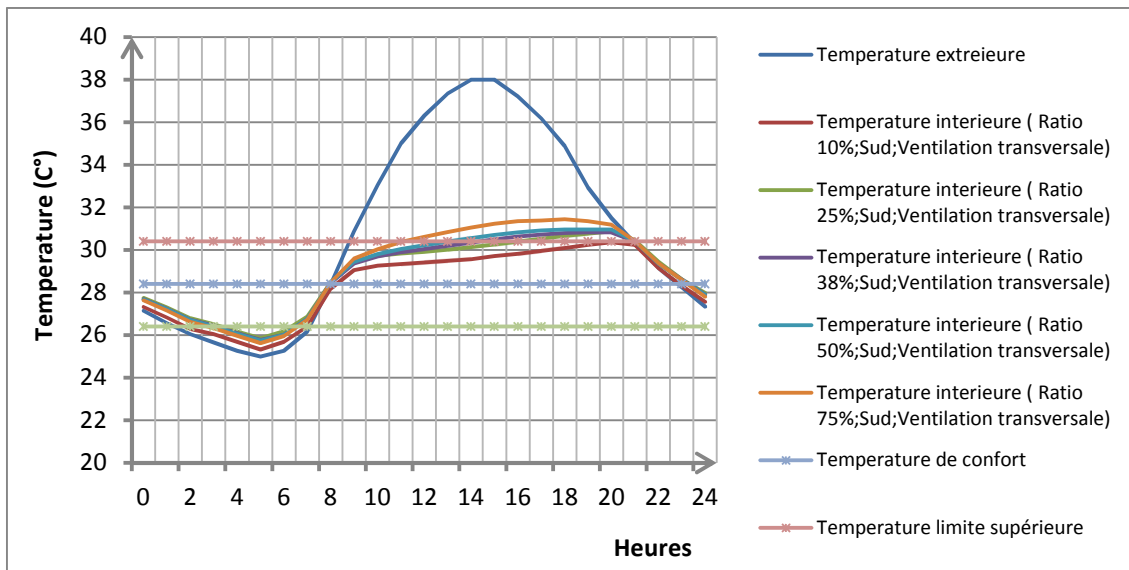


Figure IV-30: Variation de la température intérieure simulée avec différents rapport WWR (Ventilation transversale) [Période estivale, journée du 14-07-2016]

Ces résultats nous permettent de constater que l'impact du type de la ventilation naturelle (ventilation traversante) n'est pas aussi important dans l'abaissement de la température intérieure en période diurne.

IV.6.2-6-Le 6^{ème} scénario : La vitesse du vent

De façon à évaluer l'effet du vent sur la variation de la température intérieure, Cinq vitesses ont été analysées (0 m/s, 2 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 15m/s). Selon les figures (IV-31, IV-32, IV-33, IV-34, IV-35) la vitesse du vent est aussi un paramètre qui a un impact important sur la variation de la température intérieure.

On observe que :

- Pour une vitesse du vent nulle (air extérieur stable) la température de l'air intérieure augmente.
- Plus la vitesse du vent est importante, plus la température de l'air diminue.
- La vitesse du vent de 15m/s est la plus favorable, au contraire la vitesse du vent nulle est la plus défavorable
- Une vitesse de vent importante avec un petit rapport WWR donne les meilleurs résultats tout en améliorant les conditions thermiques intérieures (la température intérieure est dans la zone confort toute la journée).
- La ventilation nocturne a un meilleur effet sur la réduction de la température de l'air, lorsque la vitesse du vent est maximale (15 m/s).

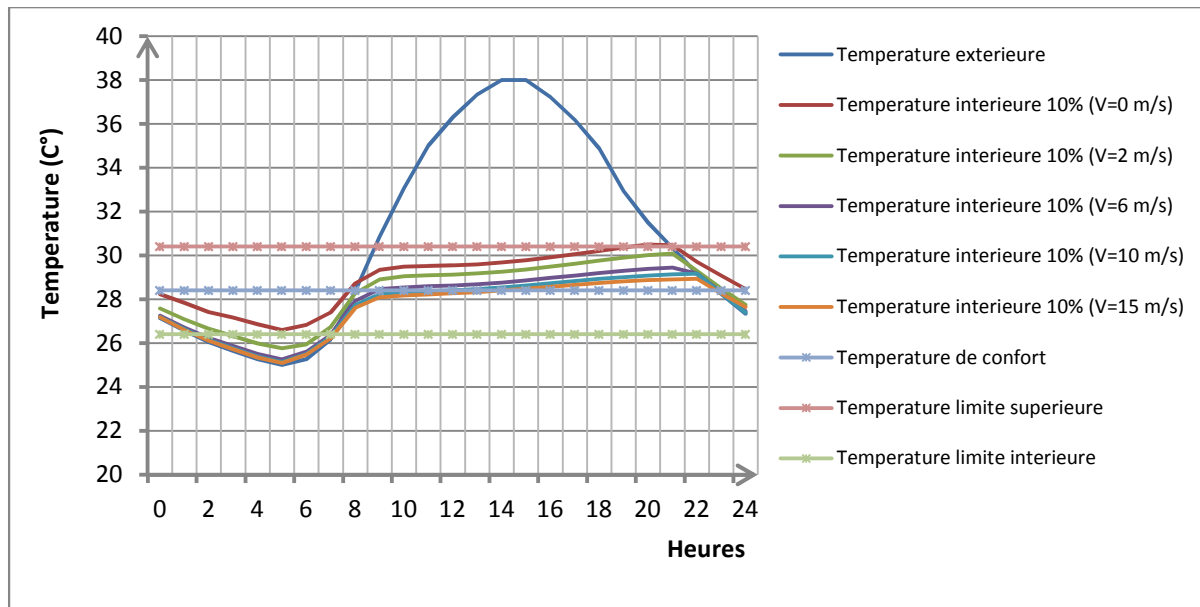


Figure IV-31: Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 10%). [Période estivale, journée du 14-07-2016]

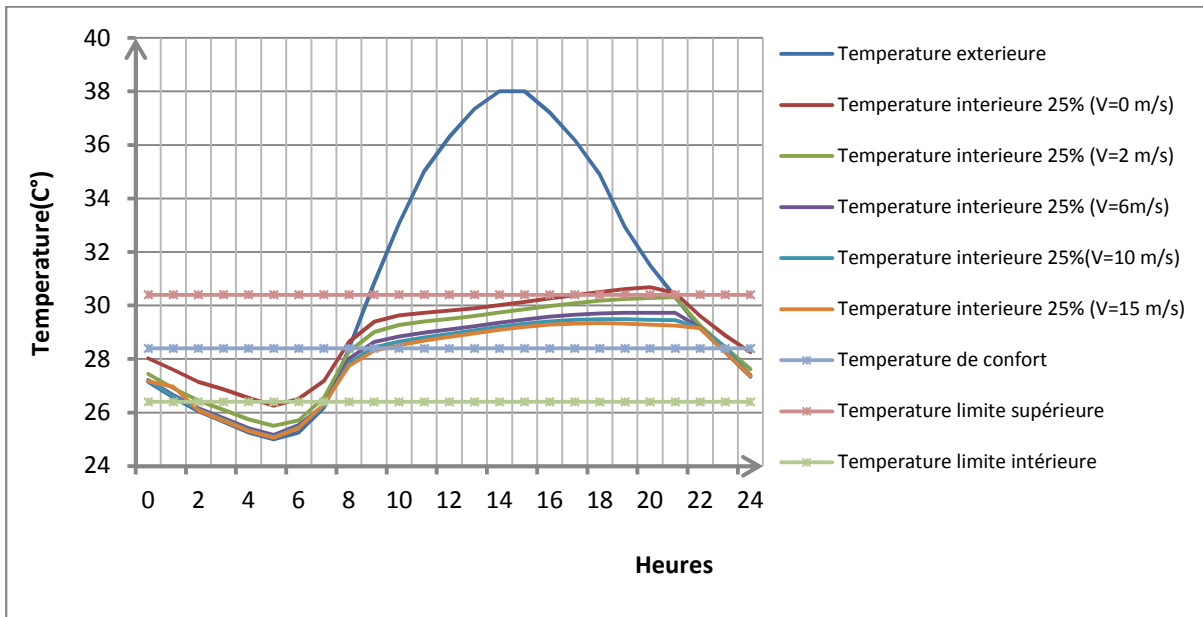


Figure IV-32: Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 25%). [Période estivale, journée du 14-07-2016]

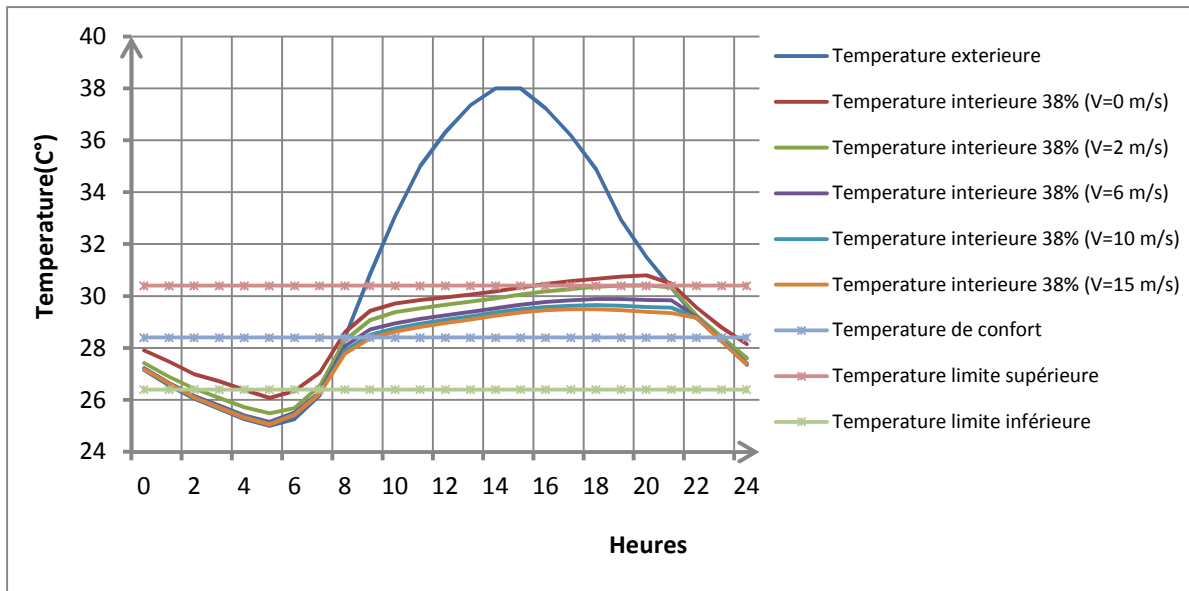


Figure IV-33: Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 38%). [Période estivale, journée du 14-07-2016]

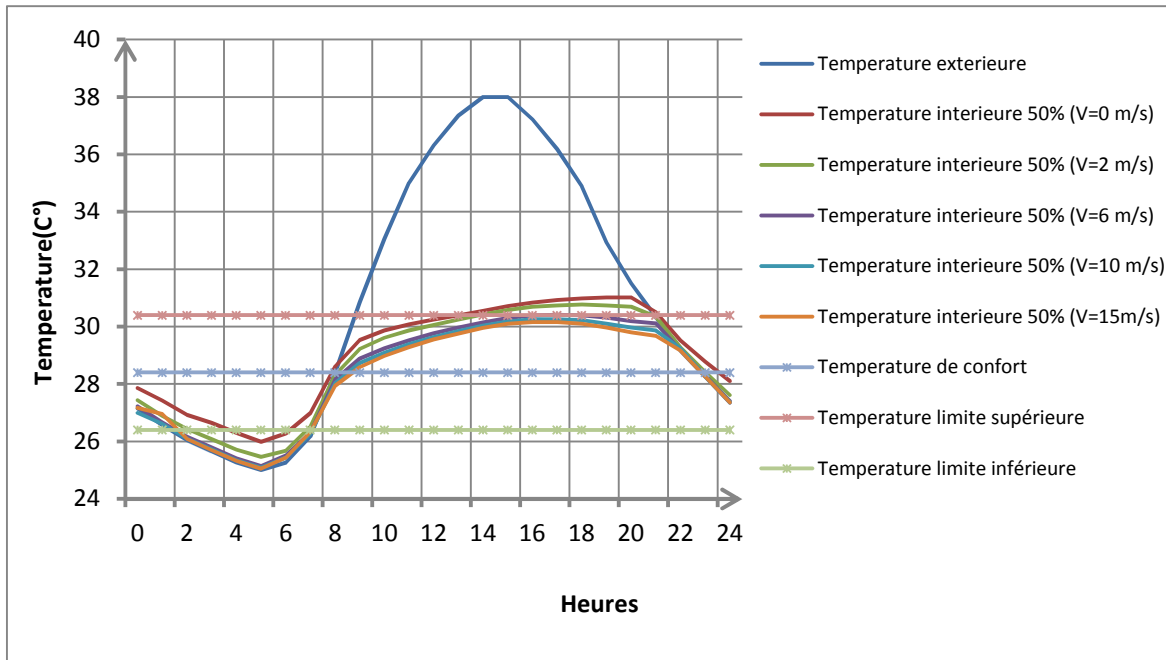


Figure IV-34: Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 50%). [Période estivale, journée du 14-07-2016]

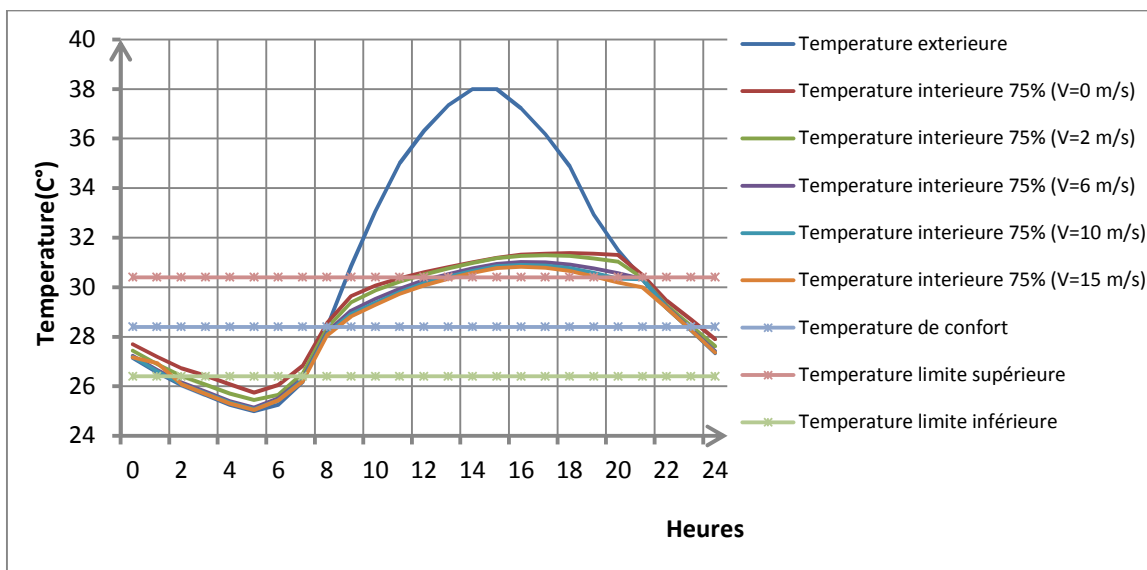


Figure IV-35: Variation de la température intérieure simulée avec une vitesse de vent variable (Cas orientation Sud, WWR 75%). [Période estivale, journée du 14-07-2016]

Donc on peut déduire qu'une vitesse de vent optimale est demandée pour accélérer l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur. Cet échange évacue la chaleur accumulée pendant la journée.

IV.6.2-7-Calcul du volume d'air échangé par ventilation à travers la fenêtre

Le volume d'air échangé par ventilation à travers une fenêtre où une porte ouverte selon (Camill Allocca ,2001),(A. Abwi ,1998) ,(Van der Maas J. Roulet,1996) :

$$V_{air} = 1/3 \cdot C_d \cdot A \sqrt{g \cdot h \cdot \Delta T / T_{ao}}$$

A : La surface de l'ouverture en m².

C_d : Coefficient de décharge de l'ouverture (réduction de la vitesse de l'air à l'entrée, C_d égal à 0.6)

h : La hauteur de l'ouverture en m.

ΔT : La différence de température entre l'extérieur et l'intérieur en K.

T_{ao} : La température extérieur en K.

g : L'accélération de pesanteur en m/s²

Le volume d'air échangé par ventilation à travers la fenêtre (le cas optimal « WWR=10% ») est :

$$V_{air} = 1/3 * 0.6 * 1 \sqrt{9.81 * 1 * 1.81 / 304.02}$$

$$V_{air} = 0.048 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour les chambres de moins de trois personnes, le débit minimal à prévoir est de 30 mètres cubes/heure par local. (ASHRAE, 2004)

$$30/3600 = 0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$$

D'après le calcul on voit également que le débit d'air représente une valeur de 0.048m³/s, c'est-à-dire pratiquement cinq fois supérieure de ce que le calcul théorique réglementaire prend en compte (0.0083m³/s débit minimal). Cela signifie que le débit d'air est suffisant dans la chambre.

Le taux de renouvellement d'air ACH est alors de :

$$ACH = V_{air} * \frac{3600}{v}$$

v : Le volume de la pièce en m³

$$v = 7.50 * 3.60 * 2.55 = 68.85 \text{ m}^3$$

$$ACH = 0.048 * \frac{3600}{68.85} = 2.50 \text{ v/h}$$

Conclusion

Le chapitre de la simulation peut être considéré comme une étape complémentaire à celle du travail de la campagne de mesures. Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs séries de simulations menées dans le cadre d'une analyse de différents paramètres et leur incidence sur l'environnement thermique intérieur d'une chambre (hotel marhaba) en période estivale. Les résultats de la simulation ont démontré que divers facteurs à savoir l'orientation, la taille de la fenêtre, la hauteur sous plafond, type de vitrage, type de ventilation (traversante) et vitesse du vent peuvent aboutir à de meilleures conditions.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude :

- Concernant les dimensions de la fenêtre, cette étude a montré qu'avec un petit rapport de la fenêtre au mur externe WWR permet d'éviter le rayonnement direct et assurer un bon niveau de confort thermique.
- La température de l'air intérieur augmente avec l'augmentation du rapport de la fenêtre au mur externe WWR.
- L'orientation a un impact très important sur la température intérieure. Les résultats de la simulation ont démontré que l'orientation Sud pour la période estivale est considérée a priori la plus favorable (les apports solaires sont les plus faibles en été).
- D'autre part, les orientations les plus défavorables sont l'orientation Ouest et l'orientation Est vu les importantes surchauffes qu'elles génèrent en été.
- L'impact de la hauteur sous-plafond n'est pas aussi important dans l'abaissement de la température intérieure que celui de l'orientation et la dimension de la fenêtre.

- L'impact du type de vitrage est plus faible en été puisque la fenêtre reçoit moins de rayonnement solaire direct, les rayons du soleil étant plus verticaux.
- l'impact du type de la ventilation naturelle n'est pas aussi important dans l'abaissement de la température intérieure en période diurne.
- Enfin, la vitesse de vent est un moyen efficace pour réduire la température intérieure. Une vitesse de vent optimale est demandée pour accélérer l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur. Cet échange évacue les calories accumulées pendant la journée et participant ainsi à maintenir la fraîcheur intérieure du matin plus longtemps.
- L'effet de la ventilation naturelle nocturne sur la température de l'air intérieure diurne dépend directement de la vitesse du vent.
- Le débit d'air est suffisant dans la chambre avec une valeur de $0.048\text{m}^3/\text{s}$ supérieure à la valeur réglementaire ($0.0083\text{m}^3/\text{s}$ débit minimal) pour assurer le confort respiratoire.

On peut conclure que :

- ✓ La dimension et l'orientation de la fenêtre sont les deux paramètres les plus significatifs pour atteindre les conditions de confort requises dans l'espace en été.
- ✓ La vitesse de vent est un paramètre n'est pas contrôlé donc on peut y associer une ventilation mécanique.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de mémoire consistait à évaluer expérimentalement et numériquement l'impact de la fenêtre sur le confort thermique et respiratoire dans l'espace chambre d'un ancien hôtel à forte inertie thermique situé dans un climat chaud et aride dont la ville de Laghouat a été choisie comme cas d'étude.

La présente recherche est structurée en deux parties. La première partie (théorique) est basée sur une recherche bibliographique et documentaire qui permet une meilleure compréhension des connaissances ayant une relation avec le présent thème de recherche. Dans la deuxième partie (pratique), nous avons eu recours à l'usage de deux outils de recherche qui sont :

- L'investigation à travers les mesures in situ à l'aide d'instrumentation technique.
- Une évaluation numérique (Simulation) des résultats à l'aide d'un logiciel informatique.

L'expérience sur terrain a été menée dans deux chambres identiques et adjacentes à fortes inerties (l'une avec ventilation naturelle nocturne et l'autre sans ventilation naturelle nocturne). Les trois journées de prise de mesures (14/15/16 juillet 2016) sont caractérisées par un ciel clair (dégagé). La direction dominante du vent pendant l'été est le Sud-ouest. Le vent souffle de vitesse moyenne de l'ordre de 3 m/s à 5m/s pendant les trois jours de prise de mesures.

Les résultats de la campagne de mesure montrent que :

- La température de l'air intérieur de la chambre fermée durant 24heures est stable tout le long de la journée grâce à l'inertie du mur qui permet de stocker les flux thermiques due aux températures extrêmes par la grande capacité thermique des matériaux utilisés.
- La chambre ventilée en période nocturne est plus efficace à celle fermée durant 24heures.
- La ventilation nocturne a un effet important sur la performance de l'inertie thermique pendant les nuits d'été. Elle décharge la masse de la chambre de la chaleur excédentaire emmagasinée par le biais de l'inertie du mur pendant la journée en l'évacuant vers l'extérieur et en même temps de rafraîchir la structure par l'effet de convection afin de diminuer les températures intérieures diurnes.
- L'effet de la vitesse du vent favorise l'accélération de l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur.

En dernier lieu, et afin de valider et vérifier les résultats obtenus dans la campagne de mesures. Nous avons réalisé plusieurs séries de simulation numérique avec le logiciel « EnergyPlus » version 8.4.0. Les stratégies simulées et testées sur terrain convergent aux meilleurs scénarios pour optimiser le rendement thermique de la fenêtre. Nous avons étudié plusieurs paramètres à savoir l'orientation, la taille de la fenêtre, la hauteur sous plafond, Le type du vitrage, Le type de ventilation et la vitesse du vent.

Les résultats de l'évaluation numérique affirment que :

- Durant la période diurne, la température de l'air intérieur augmente respectivement avec l'augmentation du rapport de la fenêtre-mur WWR (10%, 25%,38%, 50% et 75%), cela est due au gain de chaleur à travers les vitrages. En revanche l'effet positif de l'augmentation du rapport WWR est surtout perçu durant la période nocturne. Ceci s'explique par une meilleure performance de ventilation naturelle avec une fenêtre plus grande, elle permet de fournir un débit de ventilation plus élevé qui est également important pour le refroidissement nocturne de la chambre.
- Les résultats du rapport de la fenêtre - mur (WWR) de 10% sont les meilleurs dans les différentes orientations testées, cependant l'orientation Sud demeure la plus avantageuse avec un minimum de température de 26,6 C°et un maximum de 30,45 C. Soit une amplitude de 3.85 C°.
- La variation de la hauteur sous plafond, le type du vitrage et le type de ventilation n'avaient pas d'impact significatif sur l'ambiance thermique.
- L'effet de la ventilation naturelle nocturne sur la température de l'air intérieure diurne dépend directement de la vitesse du vent et du rapport de fenêtre - mur (WWR).
- La vitesse du vent est un moyen efficace pour réduire la température intérieure. Une vitesse de vent optimale est demandée pour accélérer l'échange thermique par ventilation avec l'air extérieur. Cet échange évacue les calories accumulées pendant la journée et participant ainsi à maintenir la fraîcheur intérieure du matin plus longtemps.
 - ✓ Pour une vitesse du vent nulle (air extérieur stable) la température de l'air intérieure augmente.
 - ✓ Plus la vitesse du vent est importante, plus la température de l'air diminue.
 - ✓ Une vitesse de vent importante avec un petit rapport WWR de 10% donne les meilleurs résultats tout en améliorant les conditions thermiques intérieures.

D'un autre côté, le confort respiratoire a été évalué aussi suivant le même ratio fenêtre - mur et dont le débit d'air était très satisfaisant dans l'espace chambre.

A la lumière de l'évaluation numérique et du travail expérimental, les résultats obtenues affirment les hypothèses avancées, en plus, un rapport de fenêtre - mur (WWR) de 10% avec une orientation Sud permet d'éviter le rayonnement direct et assurer un bon niveau de confort thermique.

Axes pour futures recherches

Dans le traitement de ce sujet de recherche, notre étude s'est penchée sur le niveau de confort thermique et respiratoire, sans tenir compte d'autres facteurs tel que le vitrage de la fenêtre, les effets de l'infiltration et l'impact résultant sur l'économie d'énergie pour le rafraîchissement, cela formulera, sûrement, des questions qui restent en suspend, et dont les réponses constitueront sans doute de nouveaux axes de recherches.

❖ **Bibliographie**

- **A.Chatelet,P. Fernandez et P.lavigne.**(1998) «Architecture climatique, une contribution au développement durable Tome 1 : bases physiques, édition EDISUD, Aix de provence, France».
- **A. Degiovanni.**(1977) « Diffusivité et méthode flash, Revue Générale de Thermique, vol. 16, no. 185, pp. 420–442, (French) ».
- **Adrien Brun.** (2011) «Amélioration du confort d’été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l’enveloppe et stockage thermique».
- **Adrien Dhalluin.** (2013) «Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire».
- **Adrian Trząski et al.**(2014) «Impact of windows parameters on the thermal performance of a multi-family building».
- **A. Kemajou et L. Mba.**(2011) «Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude Application au cas des régions climatiques camerounaises».
- **Alexandre Faudier.**(2010) « Choice of wall materials for summer comfort ».
- **A.Liébard et A.De Herde.**(2004) « Traité d’architecture et d’urbanisme bioclimatiques ».
- **A. Liebard. et A. De Herde.** (2005) « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques - Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable».
- **Al-Tamimi et al.**(2010) « The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics».
- **A.M.E.**(2002). Agence Méditerranéenne de l’environnement et ordre des architectes du Languedoc Roussillon. «Qualité environnementale des bâtiments en Languedoc Roussillon. Montpellier : La charité».
- **Anais Lagesse et al.**(2013) «Impact of thermal mass on summer comfort in building: a numerical approach leading to a decision support tool ».
- **Ana Rita Amaral et al.**(2016) «A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect».
- **Anna Zurbuchen.** (2013) « Enoncé théorique Master EPFL - ENAC Architecture - Habiter. Une affaire de fenêtres».
- **Anunobi, A.I et al.** (2015) « Assessment of Window Types in Natural Ventilation of Hotels in Taraba State».
- **A. Ouertani et N. Ghrab.** (2001) « Influence des Scénarios Energétiques et Economiques sur les Performances Comparatives de Variantes de Bâtiments, Morcos ».

- **ASHRAE.**(2011) « Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI Approved). Atlanta: ASHRAE ».
- **Awbi, Hazim B.** (1998) «Calculation of convective heat transfert of room surfaces for natural convection. 22 *Energy and Building*, pp. 219-227 ».
- **Bastien Queyreire ,Julie Randriamose.**(2016) «La Simulation dans la Conception Architecturale».
- **Bellara Samira .**(2005) «Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective. Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine».
- **Bernard Felix Dubor.**(1986) « Fernand Pouillon monographies».
- **Bernstein Daniel et al.** (1997) « Anatomie de l'enveloppe des bâtiments: construction et enveloppes lourdes Paris: Edition LE MONITEUR, p 31-32 ».
- **B.Givoni.** (1976) « Man, Climate and Architecture. England, Applied Science Publishers Ltd ».
- **B.Givoni.**(1978) «L'homme, l'architecture et le climat , Edition du moniteur ».
- **B.Givoni.**(1991)« Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems, *Energy and Buildings* vol 17, pp177-199 ».
- **B.Givoni.** (1994) « Passive and low-energy cooling of building, New York, International Thomson Publishing ITP ».
- **B.Givoni.**(1998) «Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods.» *Energy and Buildings* vol. 28: pp. 25-32».
- **Blondeau et al.**(1997) « night ventilation for building cooling in summer».
- **Bouchahm guermia et Bourebia fatiha.** (2010) «L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe a constantine».
- **Building Code of the Philippines,** Section 805. (2013)
- **C.A. Balaras.** (1996) «The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods, *Energy and Buildings*, vol 24: pp 1-10».
- **Camille A., Qingyan C. et Leon R. G.** (2001) «Design of single_sided natural ventilation ».
- **Caroline Lecourtois.**(2008) « Séminaire international sur l'architecture et le développement durable, université de Biskra, Article : Enseigner la conception architecturale assistée par ordinateur , thème 4, p : 473».
- **C.A.Roulet .**(2004) «Sante et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments».
- **C. Bougriou et al.** (2000)« Protections Solaires des Fenêtres».

- **C.Diaz.**(1994) «climate-responsive design for non-domestic buildings in warm climates optimisation of thermal mass for indoor cooling».
- **C. Di Perna et al.**(2010) «Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads».
- **Chatelet,P .Fernandez et P.Lavigne.**(1998) «Architecture Climatique, Une Contribution Au Développement Durable.Tome 2 Concepts et Dispositifs ».
- **C.Helena.**(1998)«Bioclimatism in vernacular architecture. Renewable and Sustainable Energy Reviews».
- **Christian Bousquet.**(1986) «L'habitat Mozabite au M'zab, Editions du CNRS Annuaire de l'Afrique du Nord Tome XXV».
- **C.Koranteng.**(2015) «Passive Analysis of the Effect of Window Size and Position on Indoor Comfort for Residential Rooms in Kumasi, Ghana».
- **CNERIB** Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.
- **CSD Azur, Domene, In Vivo.** (2010) «Développer une architecture bioclimatique méditerranéenne inertie thermique».
- **CSTB** Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- **CSTB.**(2004)«Impact de l'inertie thermique des bâtiments sur le confort d'été, Rapport d'étude».
- **C.Tantasavasdi,J. Srebric, et al.**(2001) « Natural ventilation design for houses in Thailand».
- **D.B.Crawley, Jon W Hand, Michaël Kummert et T.Brent.** (2008) « GriffithContrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs».
- **D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann et C.O. Pedersen.** (2000) « EnergyPlus: Energy Simulation program .ASHRAE Journal 42, 49-56».
- **De Gidds, W. and W. H. Phaff.** (1982) « Ventilation Rates and Energy Consumption due to Open Windows. A Brief Overview of Research in the Netherlands, Proc. of the Third IEA Air Infiltration Center Conference, Vol. 1».
- **D. G .Stephenson.** (1964) « Gains de chaleur solaire au travers des fenêtres et des parements vitré Publié à l'origine en novembre ».
- **Di Perna et al.**(2011) «Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads».
- **D. Ogoli.**(2003) « Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass».

- **Donald watson et roger camous.** (1983) «L’habitat Bioclimatique .De la conception à la construction ».
- **D.Watson et R.Camous.**(1979) « L’Habitat Bioclimatique ,De la conception à la construction ».
- **D. Wright.** (1978) « Soleil,Nature,Architecture.éd Parenthèse,France ».
- **E.Maldonado ,S.Yannas, et al.** (1997) «Studies of the Thermal Performance of Buildings in Summer in Southern Europe.” International Journal of Solar Energy v. 19: pp. 161-178 ».
- **Emmanuel’s Heeren.** « Formation Bâtiment Durable Energie, Bruxelles Environnement : les logiciels utilisés dans le cadre de développement de projets passifs ou «très basse énergie» : Introduction ».
- **E.Shaviv and I. G. Capeluto.**(1992) «The relative importance of various geometrical design parameters in a hot, humid climate. ASHRAE Transactions. v. 98: pp. 589- 605»
- **E.Shaviv et al.** (2001) «Thermal mass and night ventilation as passive design strategy».
- **E. Stéphane et al.**(2014) «Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings».
- **Fabio Munaretto.**(2014) « Etude de l’influence de l’inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments».
- **F.Allard.**(1998) «Natural ventilation in buildings—a design handbook, James & James Ltd., UK».
- **Fewzi Fardeheb.**(1987) « Effect of a sloped roof on the radiant cooling capacity of a courtyard house».
- **Filippo Calcerano, Carlotta Cecchini.**(2015) « Passive cooling strategies in the refurbishment of Mediterranean buildings: simulation analysis of thermal mass and natural ventilation combination».
- **F.M.Elaiab.**(2014) «Thermal comfort investigation of multi-storey residential buildings in Mediterranean climate with reference to Darnah, Libya».
- **Francesco Goia et al.**(2015) « Impact of opaque building envelope configuration on the heating and cooling energy need of a single family house in cold climates».
- **François Alain Frédéric Gloriant.**(2014) «caractérisation et modélisation d’une fenêtre parieto-dynamique à trois vitrages ».
- **F.Simon, JM Hauglustaine, C.Baltus et S.Liesse.** (2001) «La fenêtre et la gestion de l’énergie - Guide pratique pour les architectes ».
- **GAO, Cai Feng and LEE.Wai Ling.**(2010) «Influence of Window Types on Natural Ventilation of Residential Buildings in Hong Kong».

- **Glaverbel.**(2004) «Verre et contrôle solaire».
- **Gwenan Ingénierie.** (2012) « Caractéristique thermique dynamique, physique du bâtiment ».
- **Halil Alibaba.** (2016) « Determination of Optimum Window to External Wall Ratio for Offices in a Hot and Humid Climate».
- **H. Asan.**(2006) « Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials».
- **H. Asan, Y.S. Sancaktar.** (1998) « Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28 (2) 159–166 ».
- **H.Bencheikh.** (2007) « Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporatoire dans les climats chauds et arides».
- **Hema Sree Rallapalli.**(2010) «A Comparison of Energy Plus and eQUEST Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building».
- **H. J. Sobin.**(1980) «Window Design for Passive Ventilative Cooling: An Experimental Study. Passive Cooling Applications Handbook, Prepared for the Passive Cooling Workshop Amherst, Massachusetts».
- **J.A. Clarke.**(2001) «Energy Simulation in Building Design, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK».
- **J. Balcomb.** (1983) « Heat Storage and Distribution Inside Passive Solar Buildings. Los Alamos, New Mexico, US»
- **J. Balcomb.**(1983) « Heat Storage and Distribution inside Passive Solar Buildings. Passive and Low Energy Architecture, Crete, Greece»
- **Jean Paul Loubes.**(1984) « Archi Troglo, France: Editions Parenthèse».
- **Jean Paul Loubes.**(1988) « Maisons creusées du Fleuve Jaune: l'architecture troglodytique en Chine ».
- **Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey.**(2006)« La conception bioclimatique: des maisons confortables et économes ».
- **J.L.Izard.** (1993) « Architecture d'été-construire pour le confort d'été, Edition Edisud, Paris, P68».
- **J.L.Izard et A.Guyot.**(1979) «Archi Bio, édition Parenthèses ».
- **J.L.Izard, laboratoire ABC et ENSA-marseille.**(2006) « l'inertie thermique dans le bâtiment , envirobat-méditerranée ».
- **J.L.Izard.** (2006) « L'inertie thermique dans le bâtiment ».
- **J.M.Fitch et D.P.Branch.**(1960) «Primitive architecture and climate».

- **Julien Bouyer.** (2009) «Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments».
- **Juslin Kof.** (2009) «Analyse multicritere des strategies de ventilation en maisons individuelles ».
- **J.Van Der Maas, F.Florentzos, et al.,** (1994) « Passive cooling by night ventilation. European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, vol., Lyon, France».
- **J.W. Lee et al.,**(2013) «Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements».
- **J. Zhou et al.,**(2008) «Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings».
- **Karlsson Jonathan.**(2012) « Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort».
- **K. Benarfa .** (2007) «L'occupation de l'ilot en zone aride pour une protection contre le rayonnement solaire direct. Cas de la ville de Laghouat».
- **Khaled a. al-sallal.** (1998) «Sizing windows to achieve passive cooling, passive heating, and daylighting in hot arid regions».
- **K.Limam, F.Allard et E. Daskalaki .**(1997) «Natural ventilation research activities undertaken in the framework of pascool. Int.Jou.of Solar Energy Vol 19, pp 81-119».
- **Labreche Samia.**(2014) «Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides».
- **La Direction Des Programmes D'habitat Et De La Promotion Immobilière.** (Octobre 2007) « Le document de Prescriptions techniques et fonctionnelles applicables aux logements sociaux ».
- **Layal Chahwane.**(2011) « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments ».
- **L.F. Cabeza et al.,**(2009) «Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction».
- **Li and Xu.**(2006) «Thermal Mass Design in Buildings - Heavy or Light? International Journal of Ventilation ».
- **Linshuang Long, Hong Ye.** (2015) «Effects of thermophysical properties of wall materials on energy performance in an active building ».
- **Luigi Marletta et al.,**(2013) «The admittance method for calculating the internal temperature swings in free running buildings».

- **L. Wadsöa,c , J. Karlssona and K. Tammob.**(2012)«Thermal properties of concrete with various aggregates».
- **Madi Kaboré.**(2015). «Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne».
- **Mahbuba Afroz Jinia et Saiful Hasan Tariq.**(2012) «Performance of south facing windows for indoor ventilation & thermal comfort at Dhaka».
- **Manoj Kumar Singh et al .,**(2008) « Bioclimatism and vernacular architecture of north-east India».
- **Marcello Caciolo.** (2010) «Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraichissement des immeubles de bureaux».
- **Mazria, Edouard.** (1980) «Le guide de l'énergie solaire passive ;éditions Parenthèses».
- **M. G. Davis.**(1973) «The Thermal Admittance of Layerd Walls, Iiuiding Science 8, pp. 207-220».
- **Ministère de l'habitat.**(1993) « Recommandations Architecturales ENAG éditions, Alger, p 9»
- **Mireille Rahmeh.**(2015)«Etude expérimentale et numérique des performances de la ventilation mécanique par insufflation : qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels».
- **Mohammed ahmed hamdan.** (1994) «Thermal gains through windows».
- **Mohammad Arif Kamal.**(2011) «The Study of Thermal Mass as a Passive Design Technique for Building Comfort and Energy Efficiency».
- **M.S. Jayalakshmy, J. Philip.** (2010)«Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature».
- **Myal malika.** (2010) « Evaluation des performances énergétiques d'une fenêtre dotée d'un vitrage électrochromique ».
- **National construction code ,**Volume two, Building Codes of Australia Class 1 and Class 10 Building.
- **N. Benradouane et B. Benyoucef.** (2008) «La fenêtre et son rôle dans la conception des maisons bioclimatiques ».
- **N. Fezzioui et al.,**(2008) « Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien » .
- **N.O .Milbank, J.H. Lynn.** (1974) « Thermal response and the admittance procedure, BSE, vol. 42, May, pp38-51».

- **Norbert Lechner.(1991)** « Heating, Cooling, Lighting: sustainable design methods for architects».
- **Norbert Lechner.(2015)** «Heating, cooling, lighting : sustainable design methods for architects;Fourth Edition».
- **N. Safer.(2006)** «Modélisation des Façades de Type Double-Peau Equipées de Protections Solaires : Approches Multi-Echelles’, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, Centre de Thermique de Lyon».
- **O. Corbela et V. N. Corner.** (2002) «The window relevance for the architectonic design in tropical climate».
- **Oscar Hernandez Wilches.(2014)** « Etude et analyse de la ventilation et de la qualité des environnements intérieurs (QEI) dans les bâtiments de bureaux à faible demande énergétique : le cas de la Tour Elithis à Dijon»
- **O. Sidler.** (2003) « L’inertie thermique des bâtiments - consommation et confort d’été en climat méditerranéen. In Colloque, Montpellier ».
- **Pablo La Roche et Murray Milne.(2003)** «Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller».
- **Patrick Leroux.(2008)** «Guide de l’écoconstruction ,P13».
- **P. Concannon.** (2002) « Residential ventilation. AIVC Technical Note p 55-57».
- **Persson et al.,(2006)** «Influence of window size on the energy balance of low energy houses».
- **Pierre Delot.** (2015) « Confort d’été : Déphasage thermique et amortissement Diffusivité et effusivité ».
- **Pierre Lavigne.(2010)** « Comprendre les inerties thermiques dans les bâtiments ».
- **Pierre Levy et al .,(2011)** «Guide sur les reprises de fenêtres en bois dans le bâti ancien».
- **Pierre von Meiss.(1993)**« De la forme au lieu: une introduction à l’étude de l’architecture ».
- **P. Heiselberg, , K. Svidt et al.,(2001)** «Characteristics of airflow from open windows».
- **Rana Soleymanpour et al.,(2015)** «Climate Comfort Comparison of Vernacular and Contemporary Houses of Iran».
- **R. F. White.(1954)** «Effects of Landscape Development on the Natural Ventilation on Buildings and Their Adjacent Areas. RR-45, College Station, TX: Texas A&M University, Texas Engineering Experiment Station».

- **R. Kammerud et al.**, (1984) «Ventilation cooling of residential buildings».
- Roberto Gonzalo et Karl J. Habermann . (2006) «Architecture et efficacité énergétique : Principes de conception et de construction».
- **Roberto gonzalo et karl j. habermann.** (2008) «Architecture et efficacite energetique, principes de conception et de construction».
- **S .Abdou.** (2004) «Investigation Sur L'intégration Climatique De L'habitat Traditionnel En Région Aride Et Semi Aride D'Algérie- cas de Constantine et Ouargla, thèse de doctorat d'état. Université de Constantine».
- **Saddok Amel.** (2016) «Etude du confort thermique des salles de cours des établissements scolaires à différentes typologies, cas des établissements moyen et secondaire à Tizi-Ouzou».
- **Samar Jaber et Salman Ajib.** (2011) « Thermal and economic windows design for different climate zones».
- **Sami A. Al-Sanea et al.**,(2011) «Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential».
- **S. Amos-Abanyie et al.**,(2013)« Effects of Thermal Mass, Window Size, and Night-Time Ventilation on Peak Indoor Air Temperature in the Warm-Humid Climate of Ghana».
- **Santamouris, D.N. Asimakopoulos Eds.** (1996) « Passive Cooling of Buildings, James and James Science Publishers, London, UK».
- **S.Courgey.**(2008) « Chargé de missions ' Approches environnementales' AJENA,Nancy-Mars ».
- **Silvestre Jeronimo Celis Mercie.** (2009) « La température agréable manipulation des fenêtres et dynamique du confort .environnemental dans une salle de classe climatisée naturellement ».
- **Silvia Martin et Ignacio canas.**(2005) « study of vernacular architecture in spanish areas of extreme climate for the selection of bioclimatic design strategies».
- **Solange Goulart .**(2004) «Thermal inertia as a natural cooling technique for buildings in warm-humid climates Case-study in Florianopolis – Brazil ».
- **Soteris .A.Kalogirou et al.**,(2002) «Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus » .

- **S.Plemenka.**(1982) «Vernacular architecture: a lesson of the past for the future. Energy and Buildings».
- **S.Szokolay.** (1985) « Passive and low energy design for thermal and visual comfort. Passive and Low Energy Ecotechniques, 3rd International PLEA Conference, Mexico City, pp 6-11.Eds A. Bowen and S. Yannas. Pergamon Press, Oxford».
- **S.Szokolay.**(1996) «Thermal design of houses for warm-humid climates, Building and Urban Renewal –PLEA, Louvain-La-Neuve, Belgium, 16-18 July».
- **Tareb,** Intégration Architecturale. Enveloppe du bâtiment, Chapitre 2.en ligne https://www.newlearn.info/packages/tareb/docs/lea/lea_ch2_fr.pdf.
- **Tetsu Kubota et al.,**(2009) « The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia ».
- **Tiberiu Catalina.,**(2009) «Effet de l’inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d’une habitation».
- **T.Kumirai, DCU Conradie.,**(2013) « thermal performance of heavy-weight and light-weight steel frame construction approaches in the central pretoria climate».
- **Turgay Coşkun et al.,**(2015) « The importance of internal heat gains for building cooling design».
- **U.S. Department of Energy.** (1997) «What’s New in Building Energy Efficiency, Selecting Windows for Energy Efficiency».
- **Van der Maas et Roulet, J.** (1990) «Ventilation and Energy loss rates after opening window. 11 no 4 Air infiltration review, pp. 12-15».
- **Ventilation, Building Regulations,** Page 11. (2009).
- **V. Geros et al.,**(1999) «Experimental evaluation of night ventilation phenomena».
- **V. Hopkins, G. Gross and D. Ellifritt.** (1979) ASHRAE Trans.. R5 885-902.
- **Vincent Félix.** (2011) «Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire».
- **Zahra Ghiabaklou.** (2010) «Natural Ventilation as a Design Strategy for Energy Saving».
- **Zhaosong Fang and al.,**«2014 The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer».
- **Zhiqiang (John) Zhai et Jonathan M. Previtali.**(2008) «Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation».

❖ **Webographie**

- <http://www.e-rt 2012.fr>
- <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>.
- <http://www.patrimoine.vd.ch>.
- <http://pgj.pagesperso-orange.fr/latlong>.
- <https://www.renovermonecole.be/fr/objectifs-bien-etre/confort-respiratoire>.

Annexe I:❖ **Données météorologiques de la ville de Lagouat pour la période de 2016**

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Tmoy	10.7	11.2	12.8	19.3	22.9	28.2	31.2	29.8	25.2	21.2	13.2	9.3
T moy max	17.1	17.1	22.9	25.8	29.7	35.1	38.1	36.2	33.7	27.2	18.5	13.5
T moy min	4.4	5.7	9.1	12.6	15.9	21.4	24.3	23.5	20.8	15.2	7.7	5.1
Hr moy	46	36	36	32	24	19	17	24	26	44	16	27
Précipitations moy (mm)	0.2	0.6	1.6	5.8	1.8	0.8	5.8	13.8	28.2	0.8	10.4	15.5

❖ **Calcul de la température du confort d'après la formule de Humphrey:**

(M. A. Humphrey ,1981) a proposé que la température de confort soit une fonction de la température extérieure, L'équation de la température de confort formulée est la suivante¹:

$$T_{\text{comf}} = 0.534 T_{\text{a.out}} + 11.9$$

Où T_{comf} : la température de confort en °C

$T_{\text{a.out}}$: la température extérieure moyenne du mois en °C.

$$T_{\text{comf}} = 0.534 (31) + 11.9$$

$$T_{\text{comf}} = \mathbf{28.4^{\circ}\text{C}}$$

❖ **Calcul des températures limites de confort T_c :**

✓ Pour le mois de juillet: $T_c = T_n \pm 2 \text{ K}$.

$T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{30.4^{\circ}\text{C}}$ c'est la limite supérieure du confort.

$T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{26.4^{\circ}\text{C}}$ c'est la limite inférieure du confort.

¹ M. A. Humphrey .(1981) "The dependence of comfortable temperatures upon indoor and outdoor climates, Chapter 15"

Annexe II:

❖ Plan de masse de l'hôtel



❖ Plan générale de l'hôtel (2ème étage)



Annexe III:❖ Résultats des mesures :

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre sans ventilation naturelle nocturne en période d'été (14/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	30,4	28,06	26,35	25,1	28,7	33,4	35,5	38	36,19	34,7	32,6	30,3	28,1
T int (°C)	32	32	32,1	32,1	32,1	32,3	32,5	32,5	32,6	33	32,9	32,8	32,8

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre avec ventilation naturelle nocturne en période d'été (14/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	30,4	28,06	26,35	25,1	28,7	33,4	35,5	38	36,19	34,7	32,6	30,3	28,1
T int (°C)	31,4	30	28,8	27,6	31,3	32	32,1	32,2	32,3	32,4	31,8	30,8	28,9

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre sans ventilation naturelle nocturne en période d'été (15/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	28,1	26	24,91	23,9	28,1	32,9	34,1	35,4	34,2	33,11	30,97	29	27,01
T int (°C)	32,8	32,9	32,9	32,7	32,7	32,9	32,9	32,9	32,9	33	32,9	32,8	32,8

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre avec ventilation naturelle nocturne en période d'été (15/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	28,1	26	24,91	23,9	28,1	32,9	34,1	35,4	34,2	33,11	30,97	29	27,01
T int (°C)	28,9	27,7	26,6	25,8	30,4	31	31,1	31,2	31,3	31,6	30,6	29,4	27,51

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre sans ventilation naturelle nocturne en période d'été (16/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	27,01	25,02	23,29	22	26,34	32,32	35,3	37,4	36,4	34,99	31,91	28,4	25,48
T int (°C)	32,8	32,7	32,6	32,5	32,5	32,6	32,7	32,6	32,7	32,8	32,5	32,2	32,1

- Tableaux détaillés des Relevés des températures de la chambre avec ventilation naturelle nocturne en période d'été (16/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T ext (°C)	27,01	25,02	23,29	22	26,34	32,32	35,3	37,4	36,4	34,99	31,91	28,4	25,48
T int (°C)	27,51	26,1	24,59	23,5	28,8	29,7	30,1	30,2	30,4	30,5	30,1	28,8	26,6

- Comparaison entre les températures intérieures mesurées et celles simulées par EnergyPlus de la chambre sans ventilation naturelle nocturne en période d'été (14/07/2016)

Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T int (°C) mesuré	32	32	32,1	32,1	32,1	32,3	32,5	32,5	32,6	33	32,9	32,8	32,8
T int (°C) simulé	31,57	31,38	31,11	30,84	30,85	31,08	31,22	31,36	31,56	32,03	32,26	31,95	31,79

- Comparaison entre les températures intérieures mesurées et celles simulées par EnergyPlus de la chambre avec ventilation naturelle nocturne en période d'été (14/07/2016)

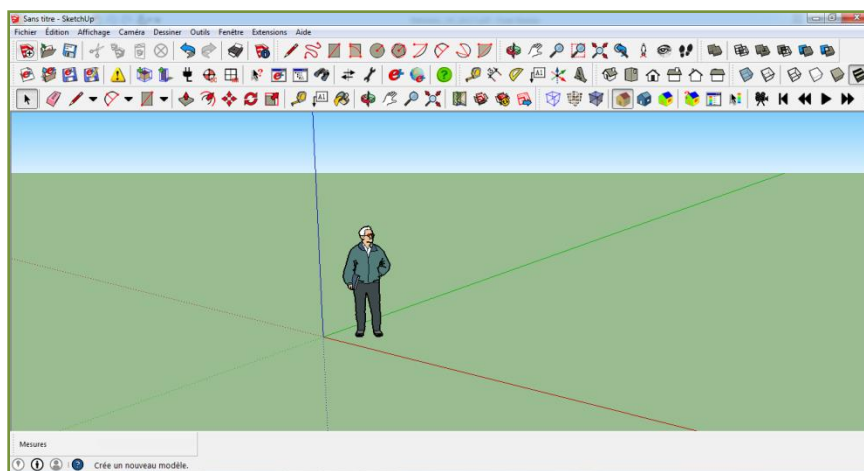
Heure	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
T int (°C) mesuré	31,4	30	28,8	27,6	31,3	32	32,1	32,2	32,3	32,4	31,8	30,8	28,9
T int (°C) simulé	27,98	27,05	26,44	26,39	28,68	30,15	30,42	30,61	30,84	31,32	31,52	29,65	28,21

Annexe IV:

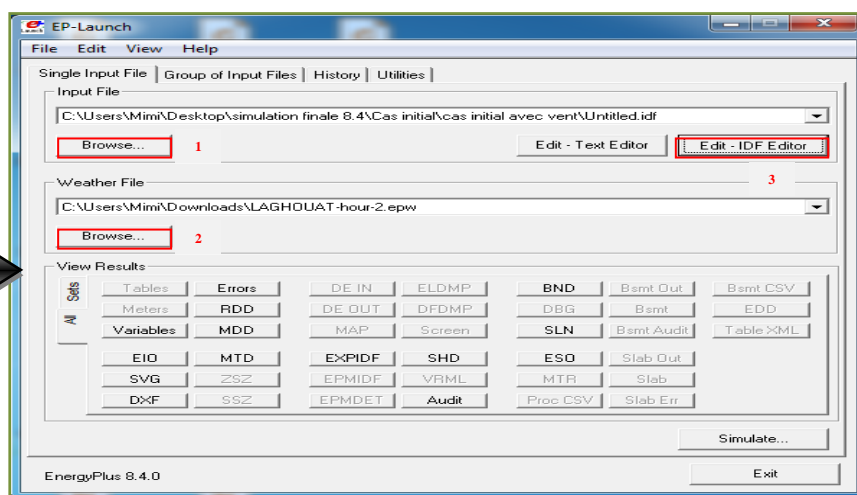
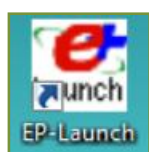
❖ Plan de l'expérimentation simulée :

- ✓ Première étape : La modélisation se fait avec le logiciel sketch up.

Une première étape consiste à concevoir le volume, en le décomposant à plusieurs zones thermiques sans avoir modifié sa forme ni ses éléments.

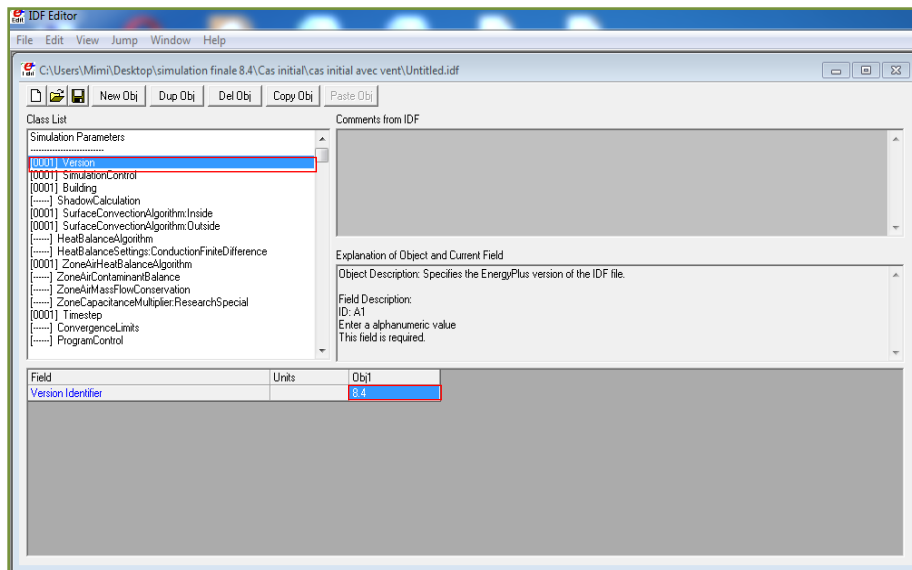


- ✓ Deuxième étape : La simulation est effectuée à l'aide du logiciel EnergyPlus.

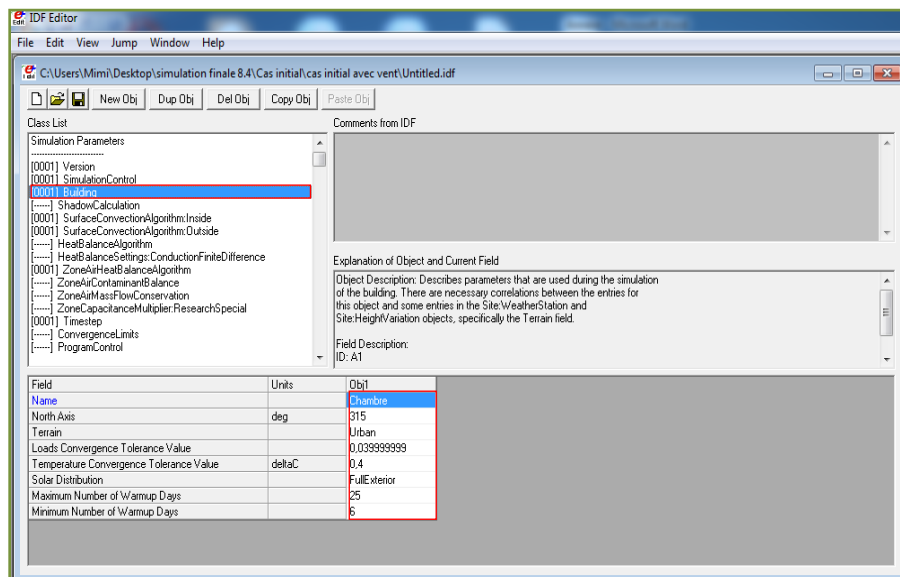


- Lancer Energyplus : en cliquant sur l'icône **EP-launch**.
- Importer le model réalisé avec le logiciel sketch up.
- Importer les données climatiques de la ville de Laghouat dans le logiciel, le fichier des données climatiques est sous forme (epw).
- Ouvrir le dossier d'Energyplus : en cliquant sur **Edit- IDF Editor**.

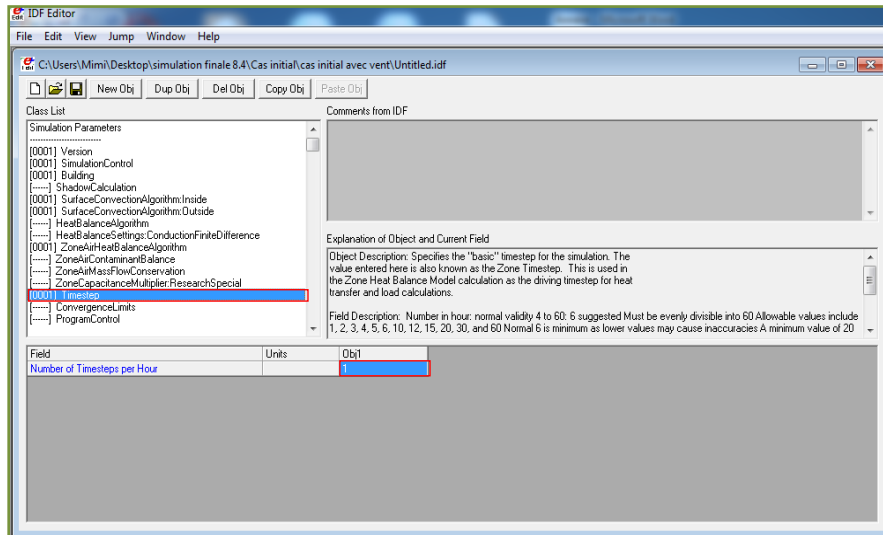
- Insérer les paramètres de la simulation.
- ✓ **Version:** la version utilisée du logiciel 8.4.0.



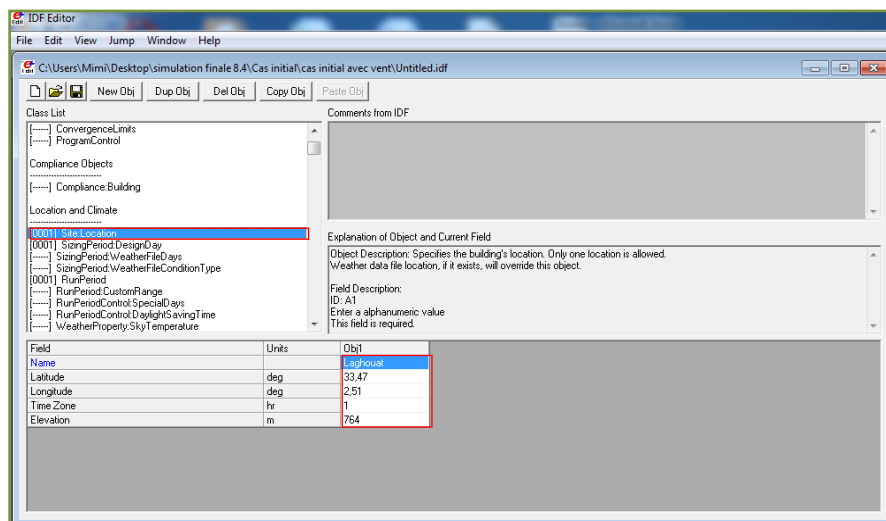
- ✓ Insérer les paramètres du bâtiment (nom, orientation, le terrain, l'ombre projeté sur le bâtiment...)



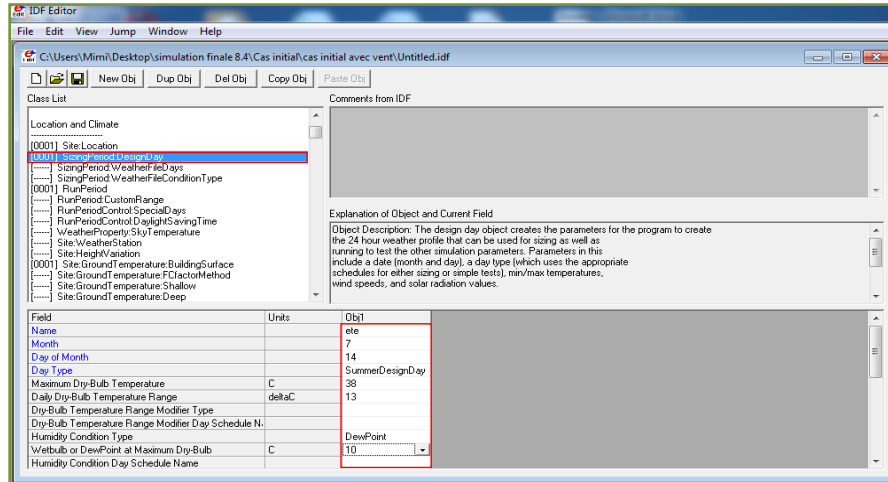
- ✓ Insérer le temps de calcul à l'heure ; par ex 1 veut dire chaque 1 heure, 4 veut dire chaque 15 min...etc.



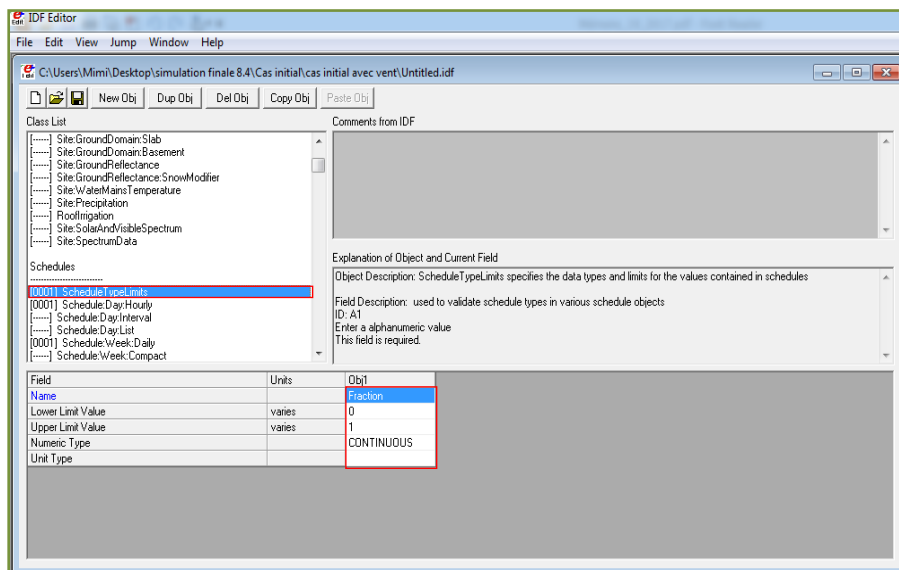
- ✓ Insérer les données de la région d'étude (location, latitude, longitude, le temps de la région par rapport au GMT, élévation)



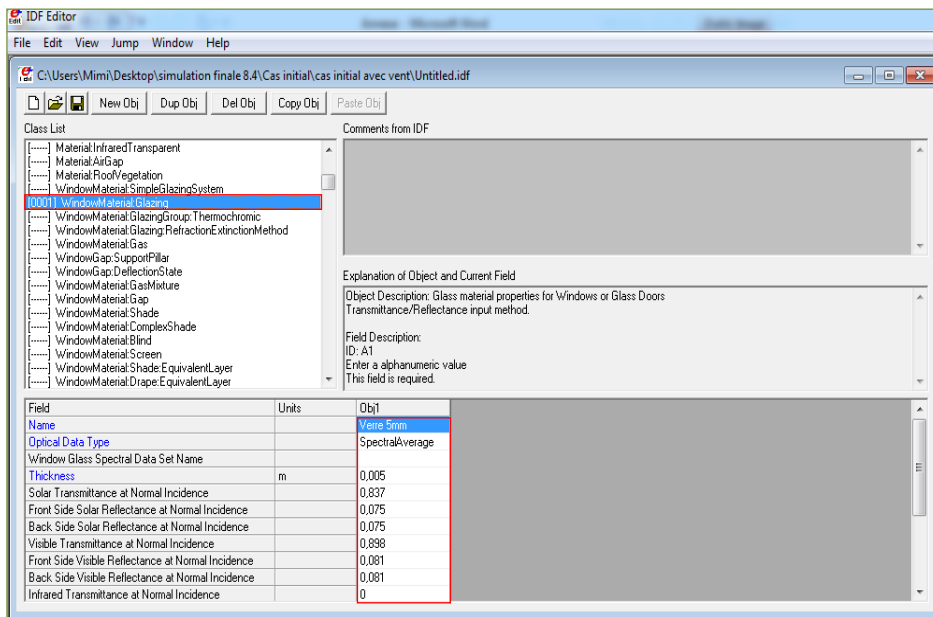
- ✓ DesignDay (Insérer les données de la date des calculs, la température maximum de ce jour, l'écart entre la température maximum et minimum, point de rosé, la pression atmosphérique, la vitesse moyenne du vent marqué dans ce jour, la direction du vent)



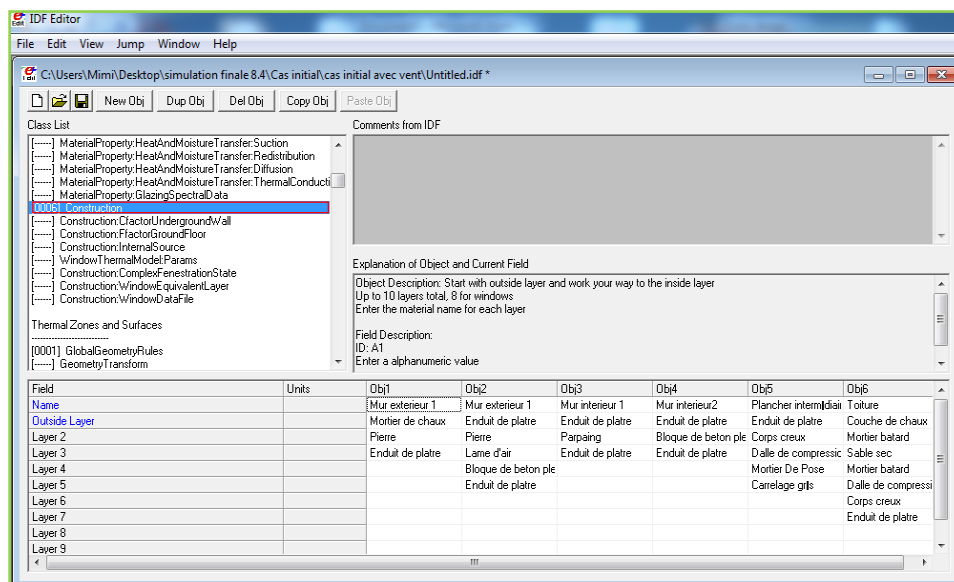
- ✓ Une hiérarchie de pièces de planification pour créer des horaires unique (Schedule Day : période de 24h des valeurs de l'horaire, Schedule week : consiste en plusieurs définitions Schedule Day pour une semaine entière, Calendrier : consiste en plusieurs définitions Schedule week pour une année entière, Schedule type : fonction facultative qui permet une validation et une limitation des horaires)



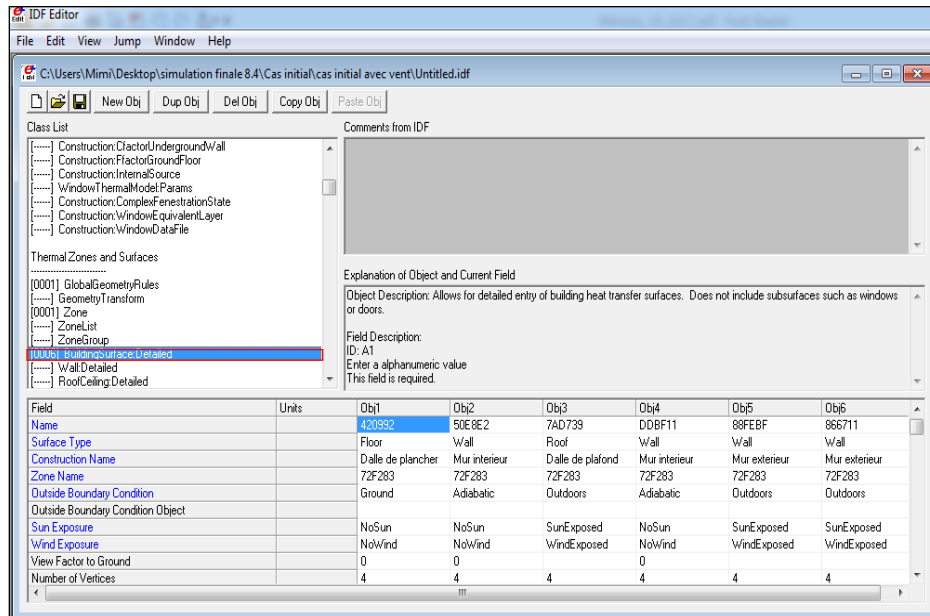
- ✓ Insérer le type et les caractéristiques du verre utilisé dans les fenêtres ou/et les portes.



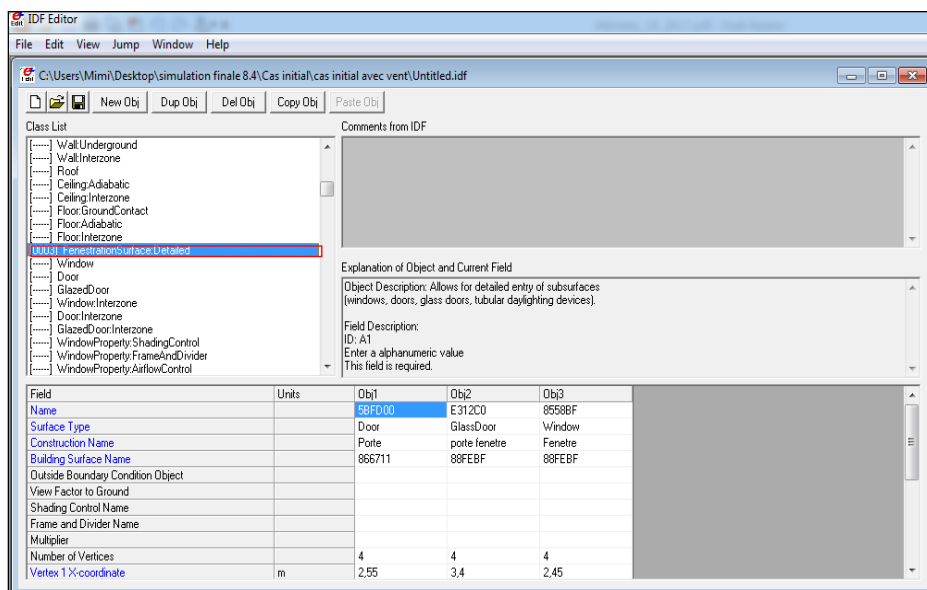
- ✓ Déterminer les composants des différentes couche des éléments de construction (mur, plancher, plafond, fenêtre, porte), commençant de l'extérieur vers l'intérieur.



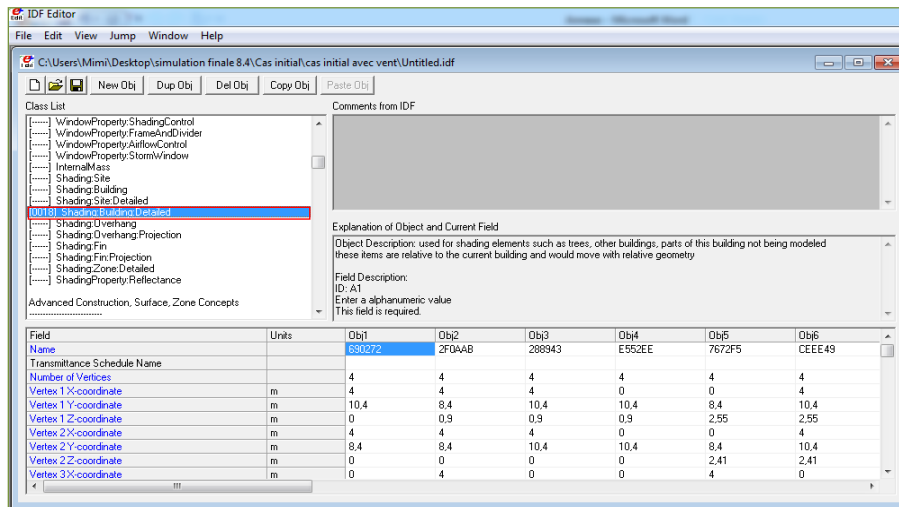
- ✓ Insérer les coordonnées (x, y, z) de chaque point de la construction.



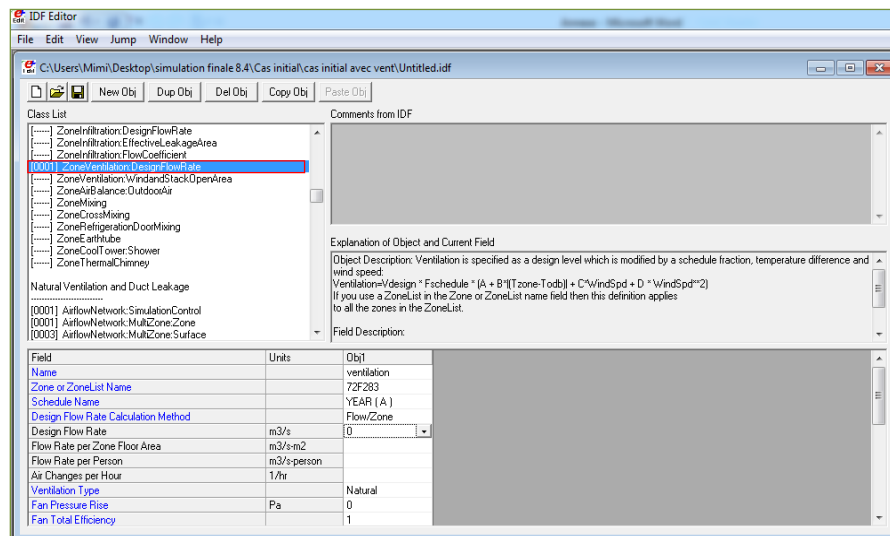
- ✓ Insérer les coordonnées (x, y, z) de chaque point de la fenestration.



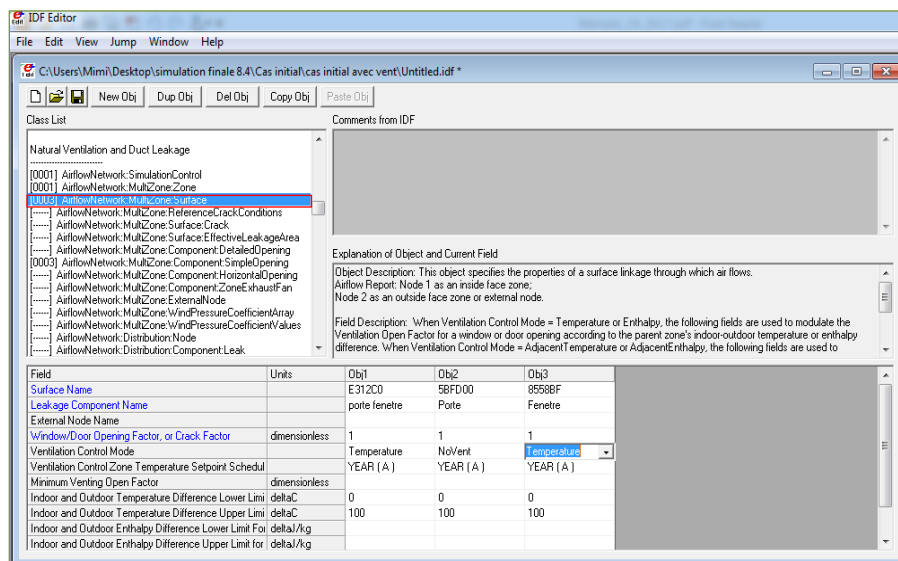
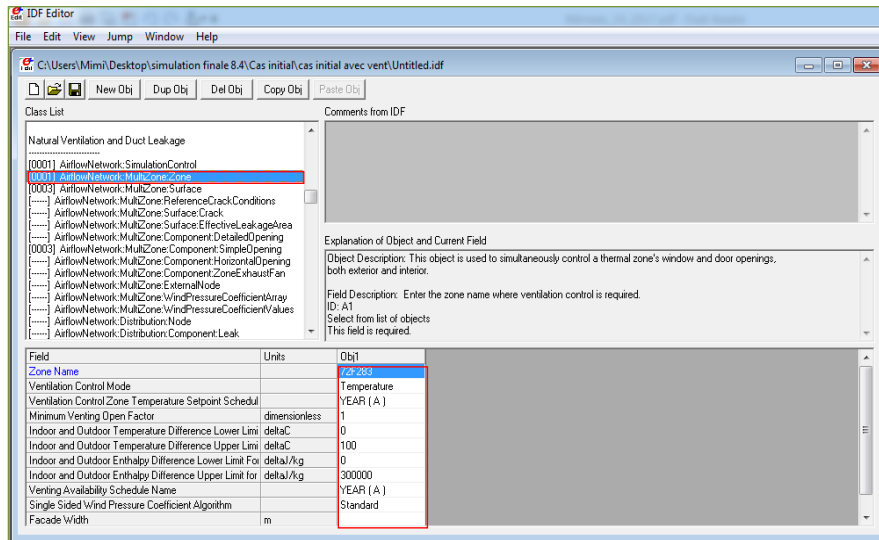
- ✓ Insérer les coordonnées (x, y, z) de chaque point de surfaces d'ombrage.



- ✓ Déterminer la zone de ventilation et le débit d'air.



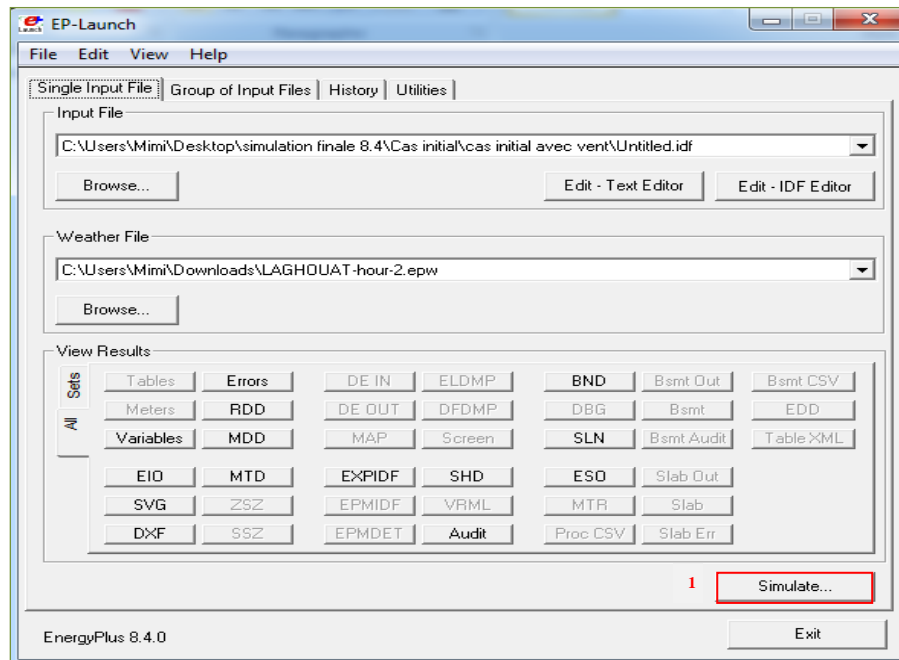
- ✓ Déterminer le mode de ventilation.



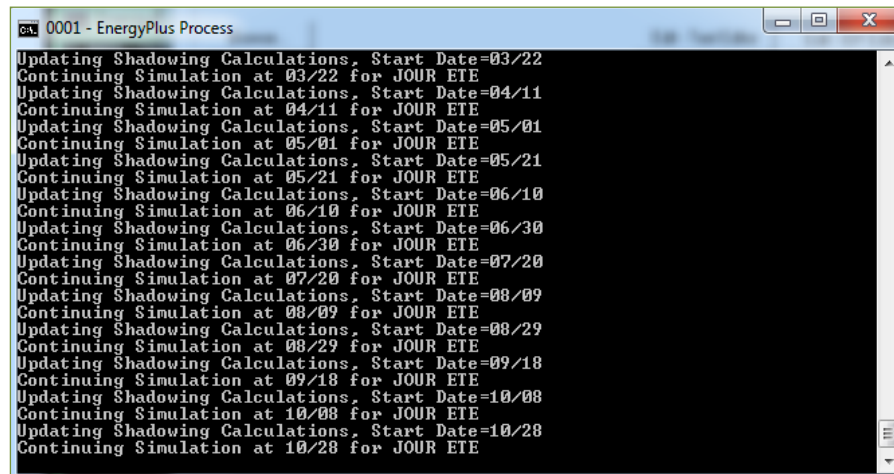
Toutes les données qu'on a insérées s'appellent ; **the input ...** maintenant on va sélectionner les **Output** ; ce sont les résultats, ils dépendent au but du chercheur ; dans notre cas ; le calcul de la température intérieur et extérieur, (**Excel**) et le dessin de bâtiment (**Autocad**).

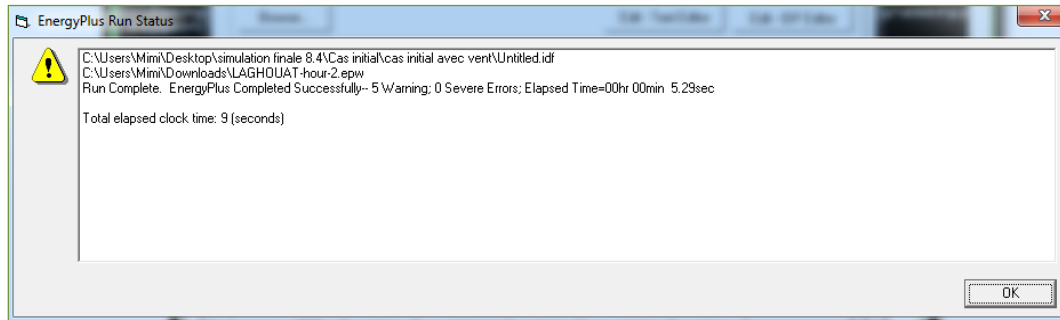
❖ Troisième étape : La Simulation

- ✓ Cliquer sur simuler.

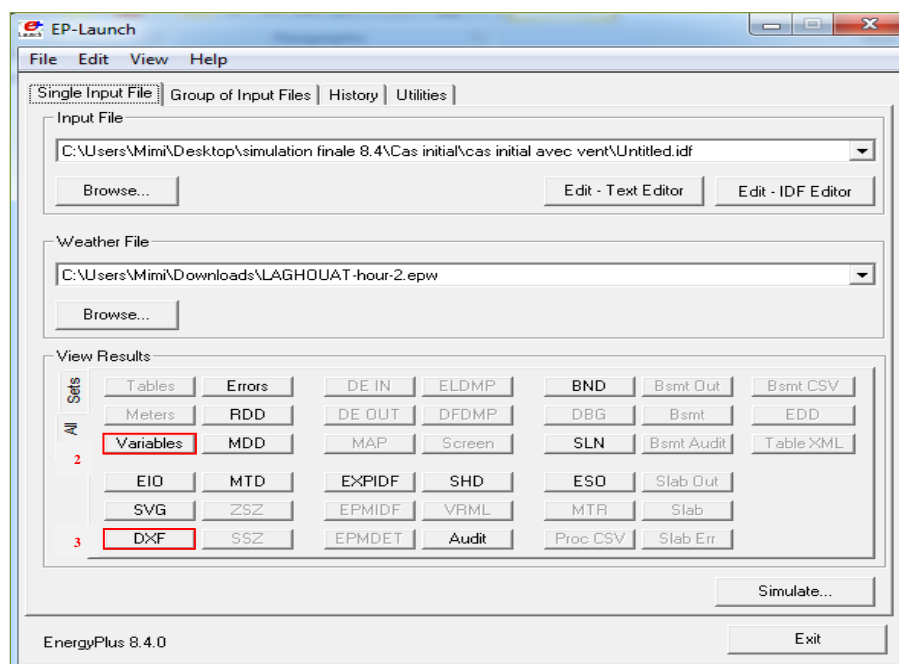


- ✓ EnergyPlus est terminé, et un message d'état s'affiche montrant que l'opération a fini avec succès ou il subit d'un Erreur.





- ✓ Cliquez sur variables pour voir les résultats sur Excel, et sur DXF pour voir le dessin d'Autocad.



	A1	Date/Time, Environment, Site, Outdoor Air Drybulb Temperature [C], Zone Mean Air Temperature [C], Zone Operative Temperature [C]																													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z				
1	Date/Time	Environment	Site	Outdoor Air Drybulb Temperature [C]	Zone Mean Air Temperature [C]	Zone Operative Temperature [C]																									
2	01/14 01:00:00	26.56	27.546763655687	29.1499274286238	1610.84413619231	1709.24764384033	18.8007018696581																								
3	07/14 02:00:00	26.04	27.058605029888	28.797537408891	1811.8992114763	1924.38487304525	21.147283047109																								
4	07/14 03:00:00	25.65	26.778690459048	28.5496537945144	1723.12451461912	1830.58699381481	20.1111638027442																								
5	07/14 04:00:00	25.26	26.4408781115934	28.2689896825444	1782.87237922386	1875.35375034866	20.5707445406																								
6	07/14 05:00:00	25.26	1309538890341	28.001422429083	1938.29644251484	2057.39153756957	22.6252074990061																								
7	07/14 06:00:00	25.26	390991979028	28.0291537999878	1673.41106415917	1780.20341620517	19.5309414584404																								
8	07/14 07:00:00	26.17	27.087212827109	28.3198161034446	1471.52293570703	1564.20267289493	17.1748374382242																								
9	07/14 08:00:00	28.38	28.6846746550686	29.1487186979674	873.810901949332	923.291486931222	10.13853938891777																								
10	07/14 09:00:00	30.85	29.7392715184669	29.7675887060851	1.006198916770483E-002	3.168058963337116E-002	3.508635523775073E-004																								
11	07/14 10:00:00	33.06	30.1585300492628	30.0490713624243	3.20811401481746E-002	3.360013352819375E-002	3.744297402172905E-004																								
12	07/14 11:00:00	35.01	30.34101876698	30.1719695688031	3.835678960372147E-002	4.0148769555966557E-002	4.476749486895596E-004																								
13	07/14 12:00:00	36.31	30.4243952429522	30.2394180530511	4.192271767270376E-002	4.386924124819908E-002	4.89294094844043E-004																								
14	07/14 13:00:00	37.35	30.5060617896458	30.321293359731	4.475699908420371E-002	4.682252581157367E-002	5.223739388912664E-004																								
15	07/14 14:00:00	38.30	30.6141712751239	30.4383763445799	4.636669106045438E-002	4.848924132074955E-002	5.411611935160408E-004																								
16	07/14 15:00:00	38.30	30.754366861378	30.57901442515	4.60778493058669E-002	4.816794804076931E-002	5.37790246216933E-004																								
17	07/14 16:00:00	37.23	30.8447914739332	30.7197186780997	4.35048823040447E-002	4.546189232479655E-002	5.077598308170456E-004																								
18	07/14 17:00:00	36.18	30.9597414632595	30.8761626552731	3.99817337478121E-002	4.1764843670501E-002	4.666402164703793E-004																								
19	07/14 18:00:00	34.88	31.3273121743296	31.3384012526268	3.461794732398126E-002	3.624090857085741E-002	4.040376671799867E-004																								
20	07/14 19:00:00	32.93	31.744271379925	31.8246282508822	3.098054050294679E-002	3.238728028283825E-002	3.615842729102100E-004																								
21	07/14 20:00:00	31.51	31.5207959326613	31.5891859793512	1.122.73045386074	1.170.63230824187	1.3.1037634670954																								
22	07/14 21:00:00	30.33	30.759608713988	31.0243105326011	1.288.82494864198	1.334.63924093569	1.4.8088812866711																								
23	07/14 22:00:00	29.16	30.65449588636	30.519374844898	1.233.80672836612	1.300.8839213954	1.4.4001718996979																								
24	07/14 23:00:00	28.25	30.896994833521	30.0790761449166	1.551.61690046192	1.640.01269797806	1.8.1094409484351																								
25	07/14 24:00:00	27.34	28.2166537811402	29.6615801190305	1.521.62713855793	1.610.97514252595	1.7.739420384663																								

Si la simulation subit d'un **Fatal Erreur**, les résultats ne vont pas s'afficher, veuillez cliquer sur **Errors** pour connaître les fautes et les corriger.

