

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RCHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BLIDA 01

Département de Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Mécanique

Option : Installations Energétique et Turbomachines\
Energétique

Thème :

Intégration des façades ventilées dans les maisons traditionnelles de Ghardaïa

Promoteur :
Dr.Laafer AbdelKader

Réaliser par :
Boutelba Mohammed

Youbi Lina Ilhem

Promotion : 2023/2024

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant Laafer Abdelkader pour l'orientation, la confiance, la patience et ses bonnes explications qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'enveloppe architecturale joue un rôle crucial dans le fonctionnement global d'un bâtiment, impactant ses performances économiques, environnementales, esthétiques et thermiques. Les recherches dans le domaine des enveloppes de bâtiments à haute performance, axées sur l'efficacité énergétique et le confort thermique, mettent en avant la façade ventilée comme une solution particulièrement efficace.

Cette recherche en master dans la spécialité énergétique, vise à déterminer l'impact de l'intégration des façades ventilées dans les bâtiments résidentiels, sur le plan énergétique ainsi que sur le confort thermique à l'intérieur. Le cas d'étude de cette recherche consiste en une maison individuelle, située à Ghardaïa plus précisément à Beni isguen, une ville du nord-sud algérien, dotée d'un climat méditerranéen selon la classification de Köppen. Afin de mesurer concrètement les apports de la façade ventilée de cette maison, nous avons utilisé Design Builder, un logiciel de référence dans le domaine des simulations énergétique des bâtiments.

Abstract

The architectural envelope plays a crucial role in the overall functioning of a building, impacting its economic, environmental, aesthetic, and thermal performance. Research into high-performance building envelopes, focusing on energy efficiency and thermal comfort, highlights the ventilated facade as a particularly effective solution.

The aim of this master's research in the energy specialty is to determine the impact of integrating ventilated facades in residential buildings, both in terms of energy efficiency and indoor thermal comfort. The case study consists of a detached house in Ghardaïa, more precisely in Beni isguen, a town in north-south Algeria with a Mediterranean climate according to Köppen's classification. To concretely measure the contribution of this house's ventilated facade, we used Design Builder, a leading software package for building energy simulations.

ملخص

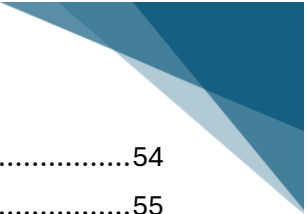
يلعب الغلاف المعماري دورًا حاسمًا في الأداء العام للمبنى، مما يؤثر على أدائه الاقتصادي، والبيئي، والجمالي، والحراري. يسلط البحث في غلاف المبنى عالي الأداء، مع التركيز على كفاءة الطاقة والراحة الحرارية، الضوء على الواجهة ذات التهوية كحل فعال بشكل خاص.

الهدف من بحث الماجستير هذا في تخصص الطاقة هو تحديد تأثير دمج الواجهات ذات التهوية في المباني السكنية، سواء من حيث كفاءة الطاقة أو الراحة الحرارية الداخلية. وتتكون دراسة الحالة من منزل منفصل في غرداية، وتحديدًا في بني إزقن، وهي بلدة تقع في شمال جنوب الجزائر بمناخ البحر الأبيض المتوسط وفقًا لتصنيف كوبن. استخدمنا برنامج Design Builder، وهو حزمة برمجيات معيارية لمحاكاة الطاقة في المباني، لقياس مساهمة الواجهة ذات التهوية في هذا المنزل .

Table des matières

Remerciement	2
Résumé	3
Table des figures :.....	7
Liste des tableaux :.....	9
Chapitre introductif	10
Introduction générale.....	11
Problématique :.....	12
Hypothèse :.....	12
Objectifs de la recherche :	13
Méthodologie :.....	13
La structure du mémoire :	15
Chapitre 1 : l'état de l'art	16
Introduction	17
1. Façades ventilées :	17
1.1. Définition :.....	17
1.2. Classement des façades ventilées :	18
1.3. Systèmes de ventilation des façades ventilées :.....	18
1.3.1. Ventilation naturelle :	18
1.3.2. Ventilation mécanique :.....	19
1.3.3. Ventilation hybride :.....	19
1.4. Mécanisme :.....	20
1.5. Principe de la façade ventilée :	20
1.6. la composition d'une façade ventilée :	20
1.6.1. La structure porteuse :.....	21
1.6.2. Isolation extérieure :	21
1.6.3. La chambre ventilée ou la lame d'air :.....	21
1.6.4. Le revêtement :.....	22
1.7. Types de la façades ventilées :	22
1.7.1. Selon le type de matériau :.....	22
1.7.2. Selon le type de finition appliqué :.....	23
1.7.3. En fonction du type de fixation des panneaux au mur :	23
2. Facteurs affectant la ventilation et la performance thermique des façades ventilées :	24
2.1. Type de climat et localisation :	24
2.2. Application au bâtiment :	25
2.2.1. Hauteur du bâtiment, type et orientation du FV :	26

2.2.2. Typologie des FV, configurations des flux d'air et modes de ventilation :	26
2.3. Géométrie et disposition de la cavité du FV :	27
2.4. Couches de construction du FV :	28
2.4.1. Peaux extérieures et intérieures vitrées :	28
2.4.2. Façades ventilées perforées et opaques :	29
2.4.3. Dispositifs d'ombrage :	30
3. les avantages environnementaux et de construction :	32
3.1. Protection acoustique :	32
3.3. Inertie du mur :	32
3.4. Protection contre l'humidité :	33
4. inconvénient des façades ventilées :	33
5. efficacité énergétique de la façade ventilée :	33
6. Quels sont les éléments à prendre en compte pour une façade ventilée ?	34
Conclusion :	35
Chapitre 2 : Présentation du cas d'étude (ksar Beni isguen à Ghardaïa).....	37
1.Introduction :	38
2. Caractéristiques générales de la ville de Ghardaïa :	38
3. Critères de choix du site d'intervention :	39
4. Etudes climatiques :	39
4.1. Température :	40
4.2. Précipitation :	41
4.3. Vent :	42
4.4. Rayonnement solaire :	43
5. La réglementation thermique en Algérie :	44
6. Situation géographique du cas d'étude	45
6.1. L'emplacement de cas d'étude	45
7. présentation de cas d'étude :	46
8. les matériaux de construction :	48
Conclusion :	53
Chapitre 3 : Interprétation des résultats.....	51
Introduction	52
1.Objectifs de la simulation :	52
1.1. Présentation du logiciel Design Builder :	52
2.Evaluation de la performance de projet :	53
2.1. Interface design Builder :	53
2.2. Plan cas d'étude :	54
2.2.1. Plan sous-sol :	54



2.2.2. Plan RDC :	54
2.2.3. Plan d'étage :	55
2.2.4. Plan de la terrasse :	56
2.3. Résultats 3D du bâtiment :	56
2.4. Matériaux du cas d'étude :	57
2.4.1. Mur extérieur :	57
2.4.2. Mur intérieur :	58
2.4.3. Toit :	58
3.L'étude d'un cas réel :	59
3.1. Présentation et protocole de la prise de mesures :	59
3.2. Interprétation des résultats (scénario 1) :	59
3.3. Proposition de correction et amélioration :	63
3.4. Interprétation des résultats (scenario 2) :	64
3.5. Interprétation des résultats (comparaison des deux scenarios) :	68
4.Résultats de simulation annuelle :	70
4.1. Confort thermique :	70
4.2. Consommation énergétique :	72
Conclusion :	73
Conclusion générale	74
Références	76

Table des figures :

Figure 1.1: façade ventilée	17
Figure 2.1: schéma représente les types de ventilation en FV	19
Figure 3.1: composition d'une façade ventilée.....	21
Figure 4.1: les différents matériaux de la façade	22
Figure 5.1 : fixation d'une façade ventilée sur un matériau faible résistance,.....	23
Figure 6.1: Type de FV et du mode de ventilation,	27
Figure 7.1: façade double peau vitrée,	29
Figure 8.1: façades ventilées opaques et perforées	30
Figure 9.1: dispositif de contrôle solaire	31
Figure 10.1: Analyse des tendances des couches de construction,	31
Figure 11.1: schéma représente le fonctionnement de la façade ventilée en hiver et en été...	34
Figure 1.2: situation graphique de la région de Ghardaïa, Source : www.opvm.dz	39
Figure 2.2: Moyenne haute et basse température	40
Figure 3.2: Température horaire moyenne à Ghardaïa	41
Figure 4.2: précipitation mensuelles moyennes à Ghardaïa	42
Figure 5.2: Vitesse moyenne du vent à Ghardaïa	43
Figure 6.2: Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à Ghardaïa	44
Figure 7.2: Plan de situation du cas d'étude.	45
Figure 8.2 : Plan de limite du cas d'étude	46
Figure 9.2: plan de la maison d'étude.....	47
Figure 1.3: insertion de fichier climatique.....	53
Figure 2.3: schéma, model data et résultat 3D du sous-sol	54
Figure 4.3: schéma, model data et résultat 3D du plan RDC	54
Figure 5.3 : schéma, model data et résultat 3D de l'étage	55
Figure 6.3: schéma, model data et résultat 3D de la terrasse.....	56
Figure 7.3 : model data et résultat 3D du bâtiment	56
Figure 8.3: résultat de 3D du bâtiment.....	57
Figure 9.3: les caractéristiques du mur externe	57
Figure 10.3: les caractéristiques du mur interne	58
Figure 11.3: les caractéristiques de toit	58
Figure 12.3: les caractéristiques de plancher	59
Figure 13.3: graphe des températures et apports thermiques du cas d'étude (28 juillet 2023)	60
Figure 14.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)	61
Figure 15.3: histogramme des températures et pertes thermique du cas d'étude (28 juillet 2023)	62

Figure 16.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (15 décembre 2023).....	63
Figure 17.3: la façade ventilée du cas d'étude	64
Figure 18.3: graphe des températures et apports thermique du cas d'étude (28 juillet 2023).	65
Figure 19.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)	66
Figure 20.3: histogramme des températures et pertes thermiques du cas d'étude	67
Figure 21.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (15 décembre 2023).....	68
Figure 22.3: graphe des températures intérieures et extérieures (avec et sans Façade ventilée) du cas d'étude (28 juillet 2023)	69
Figure 23.3: graphe des températures intérieures et extérieures (avec et sans façade ventilée) du cas d'étude (15 décembre 2023).....	70
Figure 24.3: graphe annuel des températures, apports thermiques et consommation d'énergie (sans façade ventilée) du cas d'étude	70
Figure 25.3: graphe annuel des températures, apports thermiques et consommation d'énergie (avec façade ventilée) du cas d'étude	71
Figure 26.3: histogramme des besoins énergétiques annuels (chauffage et climatisation) simulés.....	72

Liste des tableaux :

Tableau 1: Typologie de façade double peau (Bonham,2020)).....	18
Tableau 2: Classification climatique et localisation des systèmes FV	25
Tableau 3:caractéristiques thermiques des matériaux des parois de la maison	48
Tableau 4:représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude	60
Tableau 5:représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude	62
Tableau 6: représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude	65
Tableau 7: représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude	67

Liste des abréviations :

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation

VN : Ventilation naturelle

VM : Ventilation mécanique

FV : Façade ventilée

FD : Façade Double

CCF : Façade à cavité fermée

ATC : Façade transparente active

CFD : Dynamique des fluides computationnels

DTR : document technique réglementaire

STD : Simulation dynamique

BIM : modélisation des informations du bâtiment



Chapitre introductif

Introduction générale

L'enveloppe du bâtiment est une membrane protectrice qui sépare les espaces intérieurs de ce dernier et l'environnement extérieur. Elle contribue à l'esthétique ou à l'expressivité architecturale tout en assurant le confort des usagers, dans les différentes conditions climatiques.

Selon un rapport établi par l'APRUE (L'Agence Nationale pour la Promotion e la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie) en 2015, le secteur du bâtiment est responsable de 36 % des consommations énergétiques en Algérie (APRUE, “ **Rapport des Consommations Énergétique Finale de l'Algérie**”, 2015). Cela oblige les chercheurs et les professionnels de ce secteur à changer d'approche et de trouver des solutions adaptées à ce phénomène.

L'enveloppe dite “intelligente” est une composante essentielle du bâtiment intelligent. Elle consiste en une membrane qui s'adapte et réagit aux conditions environnementales, dans l'objectif d'apporter un confort optimal à l'intérieur et d'assurer l'efficacité énergétique (MOSTAFA MS. Ahmed el al. “**Development of Intelligent Façade Based on Outdoor Environment and Indoor Thermal Comfort**”, 2014). On dénombre plusieurs types de façades intelligentes notamment : les façades à double peau, les façades dynamiques, et les façades ventilées. (BERARDI Umberto, “**Intelligent facades in low energy buildings**”, 2012).

Les recherches récentes de Du Montier ont démontrées que l'utilisation des enveloppes intelligentes permet de réduire les consommations énergétiques de 50% (KHADRAOUI Mohamed Amine, “ **Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique**”, Thèse de doctorat soutenu à Biskra, 2019); par conséquent les concepteurs adoptent de plus en plus ce type d'enveloppe mais dans des contextes différents que celui de notre pays notamment sur le plan social et économique.

Dans cette recherche en master dans la spécialité énergétique, nous visons à déterminer l'apport de l'intégration des façades ventilées dans les bâtiments résidentiels situées en Algérie, sur le plan du confort thermique ainsi que sur la consommation énergétique.

A travers un logiciel de référence dans le domaine des simulations énergétiques des bâtiments, design Builder ; nous allons étudier le comportement d'une façade ventilée, appliquée à une maison individuelle située dans un milieu méditerranéen, plus précisément, à Ghardaïa au nord du Sahara algérien.

Problématique :

Dans la plupart des villes du sud et du nord de l'Algérie, les températures estivales dépassent les 40°C et l'humidité est assez élevée. Cela nous oblige à intégrer des équipements techniques tels que des unités de climatisation pour assurer un confort optimal au sein du bâtiment. Cette solution a des conséquences néfastes sur le paysage urbain, l'environnement et l'économie. Nous n'adoptons pas une approche durable.

Selon le rapport sur la consommation énergétique algérienne 2015 de l'APRUE, les bâtiments résidentiels représentent 29% de la consommation énergétique. Paradoxalement, les logements individuels représentent 94 % de ceux-ci, tandis que les logements collectifs en représentent 6 %. (APRUE, **‘Rapport des Consommations Energétique Finale de l'Algérie’, 2015**)

La consommation dans le secteur résidentiel a tendance à augmenter encore plus, surtout dans le contexte sanitaire actuel où les logements sont de plus en plus occupés par des usagers. Ils sont devenus notre seul refuge, avec l'enveloppe comme bouclier.

Quel est l'intérêt d'intégrer des façades ventilées dans une maison individuelle algérienne située dans un environnement méditerranéen ?

Afin de répondre à cette problématique globale, nous posons les questions suivantes. :

- * Qu'est-ce qu'une façade ventilée ? Pourrait-on la considérer comme étant « intelligente » ?
- * Quelle est son impact sur le confort thermique ainsi que sur les consommations énergétiques d'une maison individuelle ?
- * Quelle est sa plus-value par rapport à une façade conventionnelle ? Doit-on appliquer ce dispositif sur l'ensemble des façades des maisons individuelles

Hypothèse :

Les réponses supposées aux questions précédemment posées dans la problématique sont :

* La façade ventilée est un dispositif intelligent, qui s'adapte aux différentes conditions climatiques.

* L'utilisation des façades ventilées permettrait l'amélioration des performances énergétiques ainsi que le confort thermique des bâtiments résidentiels.

* La façade ventilée est plus performante par rapport à une façade conventionnelle, mais son apport est optimal lorsque qu'elle protège tout le bâtiment

Objectifs de la recherche :

La consommation d'énergie dans le secteur de la construction algérien a considérablement augmenté avec l'introduction des unités de chauffage et de climatisation (CVC). À la fin du XXe siècle, les chercheurs et professionnels du domaine de la construction s'intéressent aux « enveloppes intelligentes » et à leur impact sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments.

Dans le cas de l'Algérie, la question des enveloppes intelligentes, et notamment des façades ventilées, est rarement abordée dans le domaine académique et, de ce fait, on opte rarement pour ces dispositifs dans les projets résidentiels contemporains, en même temps au détriment de l'inconfort des usagers. L'intérieur des bâtiments et l'impact négatif de ces derniers sur l'environnement. L'architecte français André Ravéreau (**André Ravéreau, " l'Algérie. Et le site créa la ville"**. Source : <https://vimeo.com/329138751>) a utilisé une installation appelée « mur de masques » dans l'un de ses projets dans la vallée du Mzab, caractérisée par un climat désertique chaud. Cela comprenait l'intégration d'une cloison extérieure de protection séparée des murs de soutènement par des vides permettant la libre circulation de l'air. Ainsi, les architectes répondent aux conditions climatiques de Ghardaïa tout en proposant des solutions adaptées à son contexte socio-économique ;

Les objectifs de cette recherche sont :

*Développer nos connaissances sur les enveloppes intelligentes.

*évaluer l'effet de la façade ventilée sur la consommation énergétique dans l'habitat situé dans les zones arides (Ghardaïa) ainsi que l'établissement des recommandations sur l'adaptation de cette dernière à la maison pour maîtriser et optimiser la performance énergétique

Méthodologie :

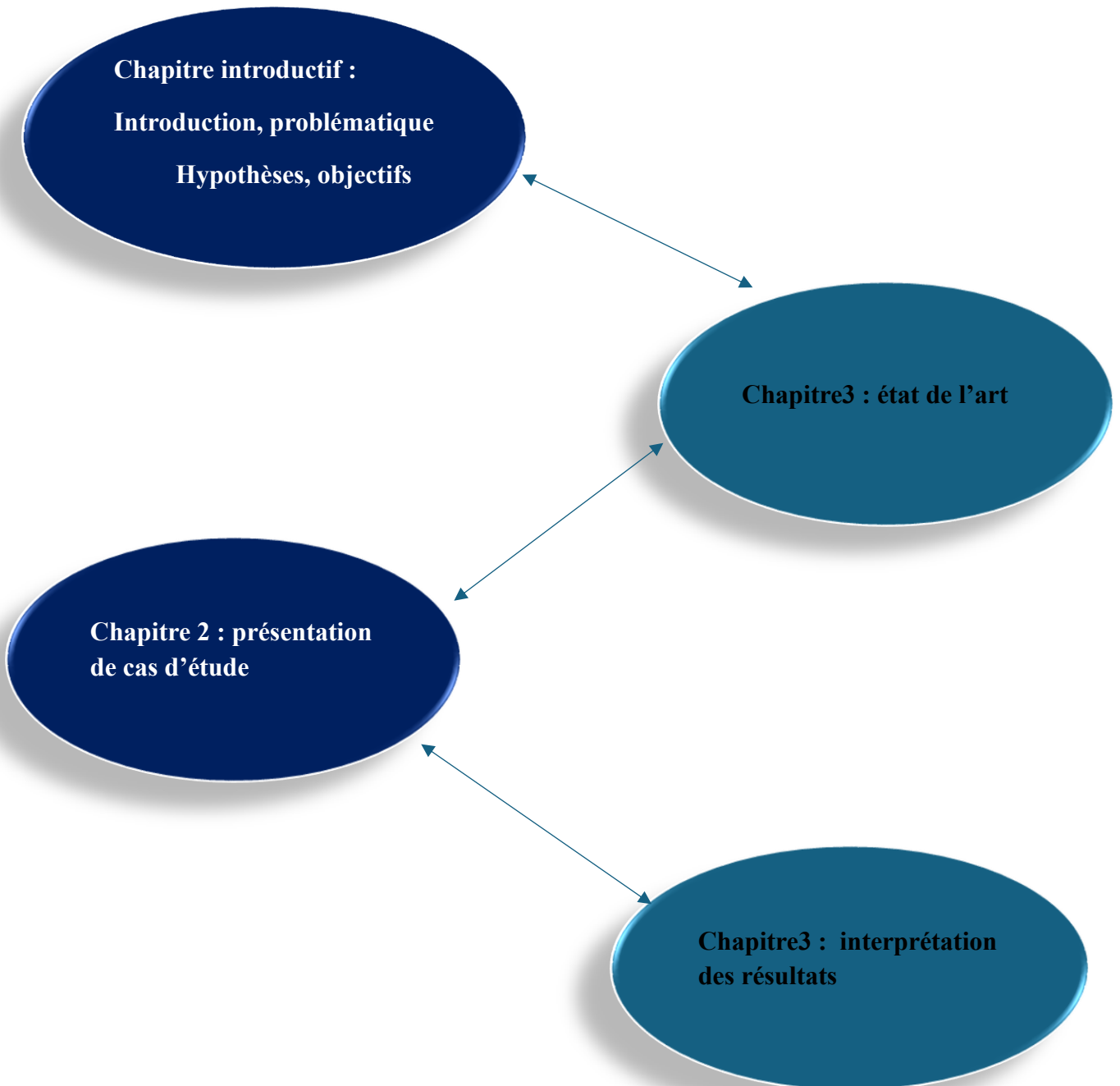
- Afin d'atteindre nos objectifs de recherche et d'acquérir une meilleure compréhension de notre sujet, notre recherche est divisée en deux parties principales, la première partie, Étude théorique consiste en une exploration de la documentation sur le sujet proposé (Livres, articles, etc....). Visite sur site, relevé

- La seconde partie, la simulation, Sur le cas d'étude (Ksar de Beni isguen) pour la vérification des hypothèses de départ.

*Dans notre simulation, nous avons opté pour deux différents scénarios afin de faire une étude comparative des différents dispositifs ;

- Scénario 1 : La maison est dotée d'une façade conventionnelle composée de mortier, sable et chaux ;
- Scénario 2 : La maison est dotée d'une seule façade sud ventilée (cas réel) ;

La structure du mémoire :



Chapitre 1 : l'état de l'art

Introduction

La sélection d'une enveloppe adéquate pour un bâtiment est cruciale car elle peut avoir un impact sur sa performance thermique et sa consommation d'énergie. La façade, qui fait partie de cette enveloppe, joue un rôle essentiel dans la fonction thermique et la performance énergétique du bâtiment. Des études ont été menées pour optimiser le comportement thermique des façades, mettant en évidence l'importance des matériaux et de leurs propriétés dans la performance thermique globale. L'objectif est d'améliorer le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments. Le dispositif de la façade ventilée représente une solution passive et performante afin d'améliorer le comportement thermique des façades et par la suite l'ambiance thermique des constructions tout en minimisant les besoins énergétiques. La façade ventilée comme système de protection des enveloppes est caractérisée par une double peau avec une distance entre la paroi du bâtiment et le bardage additionné, ce qui crée une chambre d'air en mouvement par le tirage thermique l'effet de cheminée. Le type de ventilation de cette cavité dépend de l'origine de la ventilation. On distingue trois types : la ventilation naturelle, mécanique et hybride [1].

1. Façades ventilées :

1.1. Définition :

Il existe plusieurs descriptions des façades ventilées (FV), d'après l'institut belge de recherche en bâtiment [2] le FV est défini comme une façade active couvrant un ou plusieurs étages construits. Dans ce type de façade, la chambre à air située entre le revêtement extérieur et l'isolant fixé sur le mur intérieur est ventilée naturellement ou mécaniquement.

C'est un système de construction qui est largement accepté par les architectes et les constructeurs, en particulier pour sa haute qualité, ses possibilités esthétiques et pour ses Avantages incontestés dans l'isolation thermique [3]

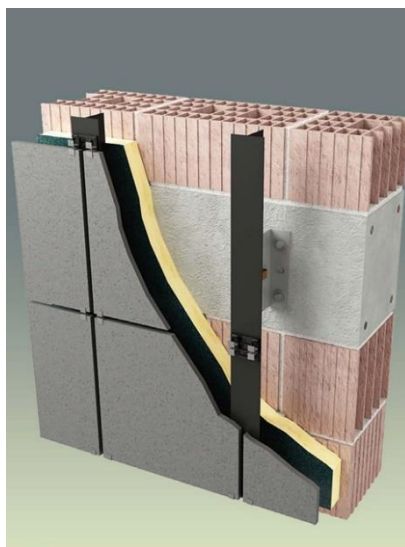


Figure 1.1: façade ventilée [50]

1.2. Classement des façades ventilées :

Il est nécessaire de classer les systèmes de façade ventilée car il existe de diverses dispositions géométriques et mode de ventilations utilisés par les chercheurs dans leurs études comme détaillé ci-dessus dans le tableau 1.

Tableau 1: Typologie de façade double peau (Bonham,2020))

Profondeur de la cavité	Cloisonnement des cavités	Type de ventilation	Mode ventilation
Profil mince	Fenêtre en caisson	Naturel (Passif)	Ventilé extérieurement (rideau d'air extérieur) Ventilation interne (rideau d'air intérieur)
Profil épais	Boite d'arbre Couloir À plusieurs étages	Mécanique (actif) Hydride (interactif)	Arrivé d'air Echappement d'air Façade respirante Variable de façade à cavité fermé

1.3. Systèmes de ventilation des façades ventilées :

Le mode de ventilation des façades ventilées peut varier en fonction des besoins spécifiques du projet et des objectifs de performance énergétique et de confort. Voici quelque mode de ventilation courant :

1.3.1. Ventilation naturelle :

Elle repose sur le principe de l'effet de cheminée. L'air frais à l'entrée de forte densité est en contact avec l'air chaud de faible densité, cette différence de densité crée un mouvement d'air à l'intérieur du canal de la façade ventilée, appelé ventilation naturelle

Le circuit aéraulique doit être équilibré et les interactions entre les étages en mouvement d'air doivent être minimiser pour assurer un renouvellement d'air égal entre les étages

1.3.2. Ventilation mécanique :

Dans ce cas, le débit traverse le canal de la façade est commandé direct par un ventilateur. Les écoulements d'air dans le canal dépendent des entrées et sorties d'air. La structure de ces écoulements influence le champ thermique et les échanges convectifs dans la façade. Aussi les propriétés thermodynamiques de l'air et de profil des écoulements à l'intérieur du canal doivent être prises en compte pour éviter les problèmes de condensation au niveau des vitrages. De la même manière, les protections solaires et leur position constituent un facteur important puisqu'ils influencent d'une manière sensible les mouvements d'air à l'intérieur du canal.

1.3.3. Ventilation hybride :

En effet, cette ventilation combine une ventilation mécanique et une ventilation naturelle (ventilation assistée). Les systèmes hybrides utilisent généralement la ventilation naturelle lorsque les conditions le permettent, mais passent à la ventilation mécanique lorsque cela est nécessaire pour maintenir des conditions intérieures confortables. La ventilation hybride peut être intégrée à d'autres systèmes de gestion de l'énergie et du confort, tels que le chauffage, la climatisation et la récupération de chaleur. Cela permet d'optimiser l'efficacité énergétique globale du bâtiment et de maintenir des conditions intérieures confortables.

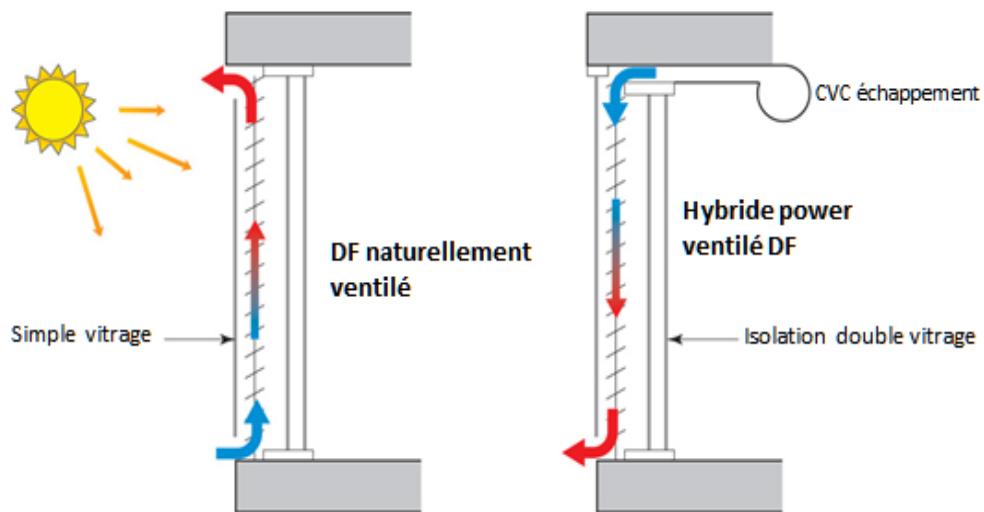


Figure 2.1: schéma représente les types de ventilation en FD, [51]

1.4. Mécanisme :

L'élément le plus crucial d'un système de façade ventilée est peut-être son mécanisme principal et le bilan énergétique associé. Étant donné qu'un FV est une technologie de bâtiment à ventilation naturelle qui utilise l'effet de cheminée solaire,

La conduction, la convection et le rayonnement sont les modes de transfert de chaleur qui influencent sur le comportement thermique des façades ventilées. Lorsqu'il y a un différentiel de température suffisant à travers la peau externe, l'effet de cheminée se produit, aspirant l'air à travers la cavité FV pour évacuer les gains de chaleur générée par le rayonnement solaire ou au bâtiment par le haut. Le débit d'air à l'intérieur de la cavité peut également être affecté par la répartition de la pression du vent au niveau des ouvertures et de la façade extérieure. De plus, les FV vitrés utilisent généralement des dispositifs d'ombrage dans les cavités pour réduire l'éblouissement et le gain excessif de chaleur solaire par temps chaud [4]

1.5. Principe de la façade ventilée :

Le système de façade ventilée représente actuellement la synthèse la plus complète des conditions qu'un mur droit remplit pour apporter le bien-être à l'intérieur du bâtiment. En effet, son rôle essentiel est de protéger le bâtiment contre l'action des agents atmosphériques et en particulier contre les infiltrations d'eau de pluie dans les murs, ce qui est généralement à l'origine de la détérioration de la structure. En espaçant les dalles de revêtement du mur, on a créé aussi une lame d'air qui, associée à l'action exercée par une couche isolante appliquée aux murs du bâtiment, améliore considérablement l'efficacité thermique de l'édifice. Mais à ces avantages fondamentaux viennent aussi s'ajouter d'autres, qui ne sont pas des moindres, et qui sont liés à la dispersion de la vapeur d'eau par le mur, à l'amélioration de l'insonorisation, à la simplicité de l'entretien et à la possibilité de transférer certaines installations à l'extérieur du bâtiment. Grâce à sa capacité d'adaptation. Ce système convient aussi bien aux nouvelles constructions qu'à la rénovation de bâtiment dégradé. [5]

1.6. la composition d'une façade ventilée :

Une façade ventilée est un système à plusieurs couches, qui garantit une fonction durable. Les façades ventilées comportent quatre couches : la structure porteuse, l'isolation thermique, l'espace de ventilation et le revêtement. La séparation systématique du revêtement et de l'isolation fournit une contribution essentielle à la qualité de la façade.[46]

L'isolation est de ce fait efficacement protégée contre l'humidité. Cette dernière est évacuée du bâtiment par le flux d'air permanent derrière le revêtement extérieur. Cela garantit le séchage rapide des murs extérieurs et empêche la condensation et l'humidité ambiante des bâtiments par capillarité, supprimant ainsi les risques de moisissure et assurant un climat intérieur sain et agréable.

Une bonne conception permettra de combiner respect de l'environnement et diminution de la consommation d'énergie. [47]

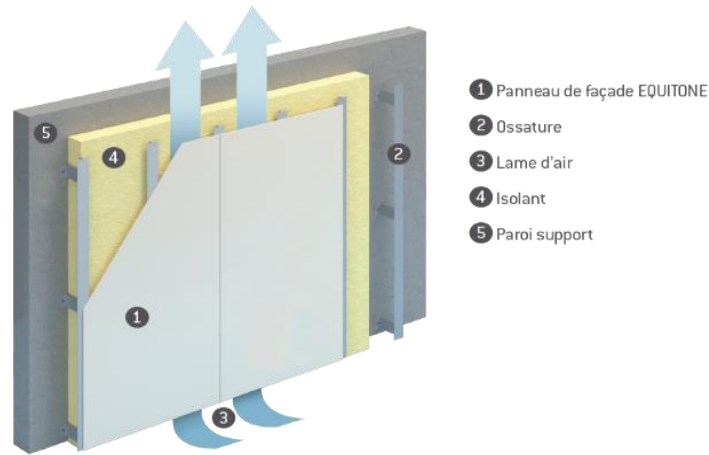


Figure 3.1: composition d'une façade ventilée : [52]

1.6.1. La structure porteuse :

Fixer le revêtement à la structure, transférant ainsi sa charge (également que le vent produit très propre). Une parfaite planéité du revêtement doit être assurée (Group Kobbi, 2012)

Elle doit être conçue pour supporter les éléments de bardage et résister à la pression du vent. Cette ossature est généralement réalisée en acier galvanisé ou en aluminium.

1.6.2. Isolation extérieure :

Agit comme une enveloppe uniforme autour du bâtiment, évitant les ponts thermiques. Doit laisser respirer les murs de soutènement, évitant ainsi la condensation et favorisant protection thermique et acoustique. Il doit être suffisamment épais pour répondre aux exigences du bâtiment. Idéalement, le matériau isolant doit être résistant au feu et solidement fixé à la structure interne. et s'adapte bien autour du cadre.

1.6.3. La chambre ventilée ou la lame d'air :

La lame d'air entre isolation et bardage doit être correctement calibrée pour assurer une bonne circulation de l'air, notamment pour créer l'effet cheminée. (L'air chaud est aspiré vers le haut)

La chambre d'air est la section entre le revêtement et le mur qui permet l'aération en évacuant l'eau de pluie et l'humidité grâce à l'effet de cheminée qui permet de renouveler l'air

1.6.4. Le revêtement :

Le revêtement protège contre les attaques associées à l'environnement. Cela détermine l'apparence du bâtiment et doit pouvoir résister à l'épreuve du temps. A cet effet, compte tenu de ces propriétés techniques, de résistance à l'usure et de faible porosité (0,1%), des céramiques ont été appliquées sur les façades.

1.7. Types de la façades ventilées :

Il existe de nombreux types de façades ventilés, qui peuvent être distingués selon le type de Matériaux utilisés, différentes zones d'une même façade, textures, systèmes, etc.... [46]

Ils peuvent être classés selon les aspects suivants :

- * Selon le type des matériaux
- * Le type de finition appliqué
- * Le type de fixation des panneaux au mur

1.7.1. Selon le type de matériau :

- Façades en céramique terre cuite, grès cérame.
- Façades en pierre : marbre, ardoise, granit...
- Façades métalliques : aluminium poli, zinc...
- Façades en composite : polymères, plastiques, bois...
- Façades en verre
- Façades en bois
- Façade en béton



Figure 4.1: les différents matériaux de la façade

1.7.2. Selon le type de finition appliqué :

- Couleurs Pâte ou naturels : toute la pièce est réalisée dans la même couleur, sans aucune couche d'email en surface.
- Couleurs Émaillées : la pièce est recouverte d'un émail avant la cuisson ; cet émail peut être mat, brillant ou avec des effets spéciaux.
- Injecte : avec la technologie d'impression numérique, de nombreux designs sont appliqués sur la pièce : imitation pierre, bois...
- Finition lisse
- Finitions texturées : création de reliefs et de saillies sur les pièces, pour apporter davantage de jeu au design des bâtiments.

1.7.3. En fonction du type de fixation des panneaux au mur :

- À fixation chimique.
- À fixation mécanique.
- À fixation sur des guides.
- À fixation sur une structure en aluminium.



Figure 5.1 : fixation d'une façade ventilée sur un matériau faible résistance, [53]

2. Facteurs affectant la ventilation et la performance thermique des façades ventilées :

Il existe deux facteurs clés qui influencent sur la performance des façades ventilées : la ventilation et les performances thermiques. La ventilation assure un débit d'air adéquat pour évacuer la chaleur accumulée et apporter de l'air frais à l'intérieur du bâtiment. Les performances thermiques permettent de réduire les pertes de chaleur en hiver et la surchauffe en été. Plusieurs facteurs de conception influencent ces performances, tels que le climat, la localisation, la hauteur du bâtiment, le type et l'orientation des cavités du système de façade ventilée, la géométrie et la disposition des cavités, les revêtements vitrés et les dispositifs d'ombrage. Il est important de noter que la ventilation des façades ventilées est intermittente et varie tout au long de la journée. Pour obtenir une ventilation et des performances thermiques optimales, il est donc essentiel d'évaluer ces facteurs de conception critique.

2.1. Type de climat et localisation :

D'après les chercheurs, les systèmes de FV sont adaptés aux différents climats. Les façades à double vitrage sont notamment très efficaces dans les climats chauds, mais peuvent également causer un problème de surchauffe en raison du rayonnement solaire élevé par temps chaud. Pour résoudre ce problème, les chercheurs proposent de modifier les propriétés du vitrage et les méthodes de ventilation afin de réduire l'accumulation de chaleur dans la cavité [6]. Les études réalisées en Chine, Turin, Oslo et Hong Kong soulignent l'importance des propriétés optiques dans l'évaluation de ces systèmes [7]. De plus, les températures de la cavité ont été observées être plus élevées dans les climats chauds de Salta en Argentine lors des périodes de refroidissement. Il est également important de prendre en compte les variations saisonnières des conditions locales telles que le vent et le rayonnement solaire au sol, qui peuvent affecter les performances des systèmes à double cavité.

Les performances d'un système de ventilation à double peau dépendent des conditions climatiques saisonnières. Les variations locales du vent et de l'irradiation solaire jouent un rôle essentiel dans la compréhension de ces performances. Par exemple, [8] une étude menée au Japon a montré que l'utilisation de volets et de brise-soleil était efficace en automne grâce à un fort ensoleillement, tandis que l'absence de rayonnement solaire nécessitait une cavité complètement fermée (CCF) en raison des températures plus basses. De même, à Belgrade, en Serbie, les systèmes de FV à étages ventilés naturellement ont montré leur efficacité pendant les saisons de transition [9]. Il est également noté que peu de chercheurs se sont concentrés uniquement sur l'effet du vent sur les performances des FV. Cependant, une étude a montré que le vent perpendiculaire aux ouvertures créait le taux de ventilation le plus faible, ce qui peut avoir une influence importante sur les performances des FV dans les bâtiments de grande hauteur soumis à des charges de vent importantes.

Table 2 : Indique que le facteur climatique le plus important affectant à la fois la ventilation et la performance thermique est le niveau d'irradiation solaire. Ce tableau récapitulatif donne un aperçu chronologique du lieu, de la classification climatique Köppen Geiger, de l'hémisphère, de la saison et de l'objectif de chauffage/refroidissement

Tableau 2: Classification climatique et localisation des systèmes FV

Auteur et chronologie de la publication	Localisation	Classification climatique de Köppen Geiger	Hémisphère	Orientation saisonnière	Chauffer ou refroidir ?
[18]	Florence, Italie	CFB, Marine Côte Ouest	Nord	Hiver et été	Les deux
[19]	Lion, France	BFC, Marine Côte Ouest	Nord	Été	Refroidissement
[20]	Hong Kong	CFA, Subtropicale humide	Nord	Été	Refroidissement
[21]	Montréal, Canada	DFB, Été chaud continental	Nord	Toute les saisons	Les deux
[22]	Espagne	CSA, Été Chaud Méditerranéen	Nord	Hiver et été	Les deux
[23]	Téhren,iran	CSA, Méditerranée	Nord	Hiver et été	Les deux
[24]	Miami, Florida	AM, Mousson Tropical	Nord	Été	Refroidissement
[25]	Arabie saoudite	BWH, désert tropical et subtropical	Nord	Été	Refroidissement

2.2. Application au bâtiment :

Selon la méthodologie utilisée pour évaluer les performances de la façade ventilée, si le chercheur choisit d'inclure l'application du bâtiment adjacent, cela aura un impact sur le débit d'air et la température de l'air dans la cavité. La hauteur et le type de bâtiment, l'orientation de la FV, la typologie de la FV et le mode de ventilation sont des facteurs de conception critique pris en compte.

2.2.1. Hauteur du bâtiment, type et orientation du FV :

La hauteur et le type de bâtiment sur lequel est appliquée une façade ventilée peuvent avoir un impact sur la ventilation et les performances thermiques du bâtiment lui-même. Dans certains cas, la hauteur de ventilation FV est la même que la hauteur du bâtiment, par exemple avec des configurations à plusieurs étages, mais il est plus courant que la hauteur de ventilation FV soit égale à un seul étage [10, 11]. Des études ont montré que l'augmentation de la vitesse du vent peut réduire la charge de chauffage et de refroidissement sur la hauteur du bâtiment FV, même pour différentes typologies FV de type couloir et de type caisson. Des chercheurs ont également constaté que les caractéristiques préexistantes du bâtiment, telles que les cheminées ou l'orientation, peuvent influencer les performances d'un système de FV appliqué dans le cadre d'une rénovation [12]. Ainsi, les caractéristiques spécifiques du bâtiment peuvent jouer un rôle crucial dans les performances d'un système de FV.

L'orientation d'une construction et la prise en compte du climat sont actuellement considérées par certains comme une originalité, une innovation apportée par le concept de bâtiment de haute qualité environnementale (HQE). Le bon sens avait-il disparu chez les concepteurs ?» Cette dernière joue un grand rôle [13] :

- * Dans les apports en lumière naturelle et les économies d'éclairage.
- * Dans le confort d'hiver par l'utilisation de rayonnement solaire pour le chauffage.
- * Dans le confort d'été avec la protection du rayonnement solaire pour éviter les fortes chaleurs.
- * Dans la protection contre les vents froids d'hiver ou l'utilisation de vent rafraîchissant d'été

2.2.2. Typologie des FV, configurations des flux d'air et modes de ventilation :

Les chercheurs ont fait des études sur les façades ventilées naturellement et mécaniquement [14]. Ils ont analysé différentes configurations de flux d'air et ont découvert que les bouches d'aération fermées étaient les plus efficaces en hiver, permettant des économies d'énergie significatives. Cependant, en été, il était nécessaire d'ouvrir les événements pour favoriser l'évacuation de la chaleur [15]. Le logiciel Energy plus a été utilisé par les chercheurs pour évaluer l'efficacité des façades. Ils ont conclu que la trajectoire du flux d'air était essentielle pour l'efficacité des façades, et qu'un modèle de plusieurs étages et une ventilation par rideau d'air extérieur fournissaient les performances les plus élevées. Cela a permis de réduire considérablement la demande d'énergie pour le chauffage, la ventilation et la climatisation. Par ailleurs, la différence de demande d'énergie entre les façades orientées nord et sud pouvait atteindre 40% en utilisant le mode de ventilation par rideau d'air intérieur. Enfin, l'impact de la géométrie de l'ouverture de la cavité sur la performance des façades dépendait du type de ventilation utilisé (vent, bouée, eau, air)

L'orientation d'un bâtiment ou la direction de la façade du bâtiment à FV aura un effet significatif sur sa ventilation et ses performances thermiques, car elle est influencée par les trajectoires du soleil. Il est intéressant de noter que, dans une perspective de rénovation, la structure existante d'un bâtiment peut favoriser la circulation de l'air à travers un bâtiment à FV. Il est donc essentiel d'étudier les performances d'un FV et du bâtiment adjacent, en particulier s'il s'agit d'apporter de l'air frais à l'intérieur.

Figure5 : Répartition des types de façades ventilées et des schémas de ventilation appliqués dans l'échantillon de l'étude. La fenêtre en caisson est le type de façade ventilée préféré car elle est principalement pratique pour les tests en laboratoire et pour les applications où les dimensions peuvent être reproduites à partir des niveaux typiques d'un bâtiment de plain-pied. Les façades ventilées à plusieurs étages sont relativement courantes en raison de leur application dans les immeubles de grande hauteur.

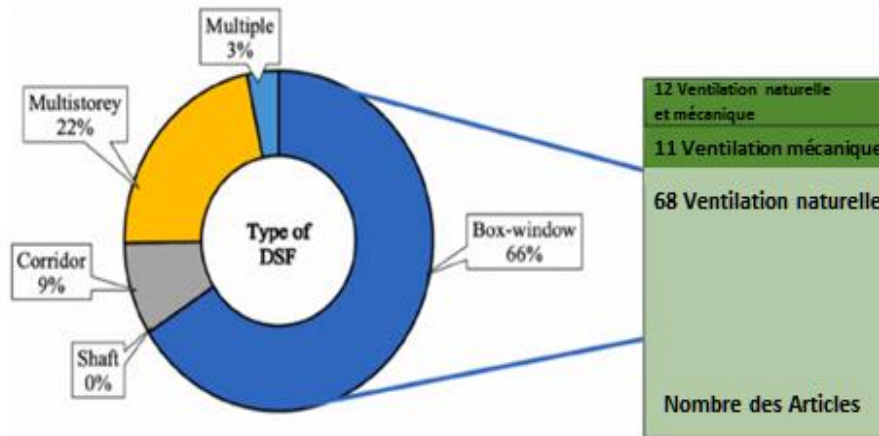


Figure 6.1: Type de FV et du mode de ventilation, [54]

2.3. Géométrie et disposition de la cavité du FV :

La ventilation et les performances thermiques sont directement affectées par la géométrie de la cavité d'un vitrage à isolation thermique. Selon une étude, un canal plus large est nécessaire en été pour produire un effet de refroidissement solaire sensible. De plus, le débit massique dans le canal augmente avec la largeur de la cavité, avec un impact maximal lorsque la largeur est de 20 à 30 cm [16]. Des études ultérieures ont confirmé la relation entre la profondeur de la cavité et les performances du vitrage. Il est intéressant de noter que les résultats

de ces études ne concordent pas avec d'autres climats chauds. Par exemple, une étude a montré qu'une augmentation de la profondeur de la cavité d'une fenêtre-caisson augmente la température de l'air à l'intérieur. De plus, une autre étude a révélé qu'une augmentation de l'épaisseur de la cavité d'une fenêtre ventilée naturellement entraîne également une augmentation de la température du vitrage intérieur. Ces résultats soulignent donc l'importance de prendre en compte le climat spécifique lors de la conception de façades avec des cavités. Des études ont été menées pour étudier l'impact des rapports d'aspect sur la ventilation et la performance thermique d'une cavité dans un système de FV. Selon une étude [17], le risque de surchauffe était plus élevé pour les FV de 8 mètres de long et 1 mètre de profondeur que pour les FV de 1 mètre de long et 1 mètre de profondeur, ainsi que pour les FV de 2 mètres de long et 1 mètre de profondeur. Ces derniers ont réussi à dissiper plus efficacement la chaleur, ce qui a entraîné une baisse de la température moyenne de l'air. Une autre étude a également examiné le rapport d'aspect d'un FV à fenêtre en caisson et a découvert que le coefficient de transfert de chaleur par convection était plus élevé dans les régions d'entrée thermique et hydrodynamique par rapport aux régions entièrement développées. Enfin, une augmentation du rapport longueur/profondeur d'une cavité a été associée à une diminution de l'efficacité des gains de charge solaire dans un climat méditerranéen [18,19].

Le dimensionnement et l'emplacement des ouvertures dans un bâtiment à ventilation naturelle contrôlée ont un impact sur les performances globales de ventilation du bâtiment. Des ouvertures plus grandes peuvent améliorer le taux de ventilation, mais peuvent créer des différences de pression défavorables pour les étages supérieurs. De plus, l'augmentation du taux de renouvellement de l'air diminue considérablement lorsque les surfaces d'ouverture dépassent 2 m². Ces recherches soulignent l'importance de dimensionner correctement les ouvertures pour optimiser la ventilation dans les bâtiments à FV [20].

2.4. Couches de construction du FV :

Les couches de matériaux qui composent la construction d'un système de FV ont également un impact sur la ventilation et les performances thermiques :

2.4.1. Peaux extérieures et intérieures vitrées :

Des chercheurs ont mené des études pour comparer les performances des façades solaires murales et des façades solaires réfléchissantes. Les résultats ont montré que ces deux derniers permettaient de réaliser des économies d'énergie, tandis que les façades solaires murales avec des façades solaires réfléchissantes entraînaient une augmentation des charges de refroidissement. Les chercheurs ont également constaté que l'utilisation de faibles coefficients d'ombrage et d'un faible facteur de transmission solaire sur la surface extérieure des façades permettait de se protéger de la lumière directe du soleil tout en laissant entrer la lumière naturelle. Une méthode de simulation FV a été utilisée pour étudier la perte de chaleur de différents types de façades en Turquie. Les résultats ont montré que les façades à cavité fermée

étaient plus efficaces pour réduire les pertes de chaleur dans les climats froids, avec 40 % de pertes de chaleur en moins par rapport aux façades à cavité ouverte. Ces résultats soulignent l'importance de concevoir des façades solaires efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les caractéristiques internes et externes de la façade ont également été examinées dans d'autres études. Par exemple, une étude à Hong Kong a évalué la performance énergétique d'un vitrage à double peau en fonction du type de vitrage et de ses couches. Les résultats ont montré qu'un tel vitrage réduisait l'énergie de refroidissement d'environ 26 % par an par rapport à un vitrage simple. Cependant, une étude ultérieure en Chine a donné des résultats contradictoires, indiquant que les vitrages à double peau avec double vitrage intérieur étaient meilleurs pour le chauffage et le refroidissement que les vitrages à double vitrage extérieur.

Le rapport de recherche examine les performances du vitrage de la façade intérieure d'un immeuble de bureaux. Les résultats montrent que la température de l'air dans la cavité de la façade est influencée par le choix du pourcentage de vitrage. Des simulations ont été effectuées à l'aide d'un logiciel d'analyse thermique pour observer les variations de température pendant l'hiver. Les résultats suggèrent que les vitrages doubles (Fv) améliorés pourraient avoir des performances supérieures à celles des vitrages simples en termes de transfert thermique [21]



Figure 7.1: façade double peau vitrée, [55]

2.4.2. Façades ventilées perforées et opaques :

Un nombre croissant d'études ont examiné l'utilisation de façades perforées et opaques dans le prolongement des divers matériaux utilisés dans la conception des FV [22]. Les façades perforées sont la couche Externe de la façade ventilée avec de nombreux ouvertures pour la

ventilation. Ces ouvertures peuvent être de différentes tailles et formes, créant des effets visuels intéressants tout en permettant à la lumière naturelle de pénétrer à l'intérieur du bâtiment. Les façades perforées peuvent également favoriser la ventilation naturelle et créer des jeux d'ombres dynamiques à l'intérieur de l'espace.

Lorsque la peau extérieure ou intérieure d'une façade ventilée est un matériau opaque plutôt qu'un vitrage transparent, on parle de façades ventilées opaques. Les façades opaques offrent généralement une bonne isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une protection contre les intempéries et les regards extérieurs.

En combinant ces deux types de façades, les architectes peuvent créer des bâtiments qui allient esthétique, fonctionnalité et performance. Par exemple, une façade opaque peut être perforée avec des motifs artistiques ou des motifs géométriques pour créer un jeu de lumière et d'ombre fascinant à l'intérieur du bâtiment tout en offrant une protection contre l'excès de lumière solaire et les regards indiscrets.

De plus, les façades opaques et perforées peuvent être conçues pour répondre aux besoins spécifiques du climat local. Par exemple, dans les régions chaudes et ensoleillées, les perforations peuvent être utilisées pour créer des brises naturelles et réduire la chaleur à l'intérieur du bâtiment, tandis que dans les régions plus froides, une isolation thermique renforcée peut être incorporée dans la façade opaque pour minimiser les pertes de chaleur.

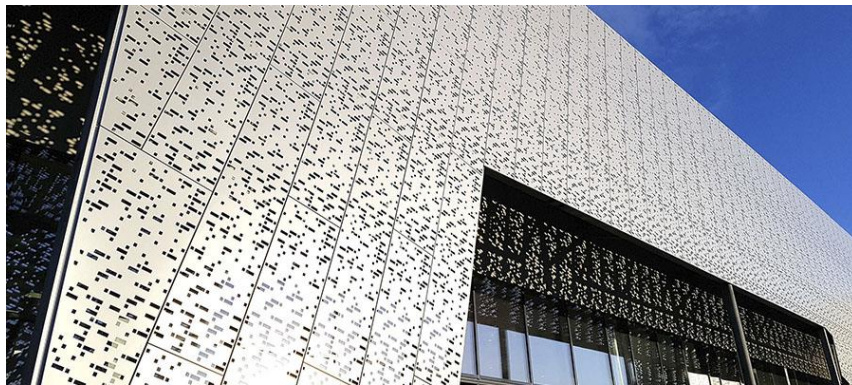


Figure 8.1: façades ventilées opaques et perforées [56]

2.4.3. Dispositifs d'ombrage :

Dans les climats tempérés, la façade sud d'un immeuble reçoit le plus de rayonnement solaire, ce qui la rend prête à être protégée par des protections solaires horizontales. En raison des différences d'angle d'azimut du soleil, les façades orientées au sud bénéficient d'un gain solaire plus important en hiver, tandis que les façades orientées à l'est et à l'ouest sont plus

critiques en été. Les orientations nord, est ou ouest conviennent mieux aux ombrages verticaux. Dans les tropiques, les choses sont inversées. Selon une étude, l'angle des lamelles des protections solaires peut réduire la température et les gains de chaleur intérieurs du verre. L'utilisation de matériaux en béton et en ciment ces dernières années a suscité un intérêt pour améliorer la masse thermique des systèmes de FV. [23] En été, le remplacement des lames de stores vénitiens par des dalles en béton pour une façade à double peau à fenêtre en caisson ventilé mécaniquement (MVDSF) a permis d'économiser 21 à 26 % d'énergie et 41 à 59 % d'énergie en hiver. Cependant, en raison de l'augmentation de l'effet de cheminée et du débit d'air dans la cavité d'air, les auteurs ont noté une certaine inefficacité dans une façade à double peau ventilée naturellement (NVDSF) avec masse thermique.



Figure 9.1: dispositif de contrôle solaire [57]

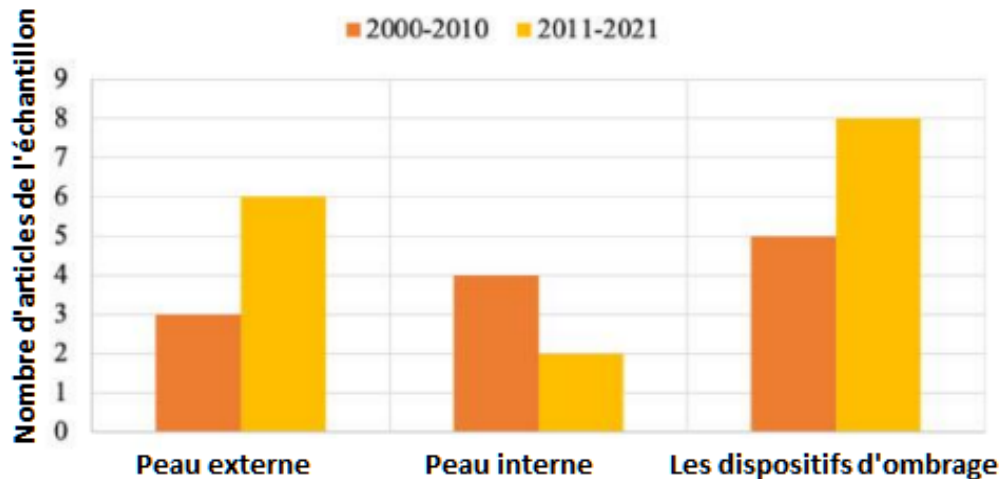


Figure 10.1: Analyse des tendances des couches de construction, [58]

Figure 10 : L'étude montre comment l'attention portée à certains aspects de la construction d'une façade ventilée a changé au cours des deux décennies de recherche examinées dans l'échantillon d'articles. Il convient de noter que, parmi les articles portant spécifiquement sur l'impact de la peau extérieure, de la peau intérieure ou des dispositifs d'occultation sur les performances des FV, les dispositifs d'occultation ont récemment connu un pic d'intérêt. La recherche actuelle sur les FV, les climats plus chauds ou à forte irradiation solaire sont dominants. Cela est confirmé par l'augmentation des peaux extérieures intelligentes ou photovoltaïques au cours des dix dernières années, qui sont particulièrement applicables aux climats à forte irradiation solaire.

3. les avantages environnementaux et de construction :

Les chercheurs ont déclaré : « Ce système présente de nombreux avantages : c'est un excellent isolant contre les changements thermiques, il représente des économies d'énergie. Dans les bâtiments, il agit comme un isolant phonique, empêche la condensation de la vapeur d'eau et est facile à installer et à entretenir. ». Économie d'énergie : Il permet de rafraîchir le bâtiment en été et d'éviter les déperditions de chaleur en hiver. Économie d'énergie et confort cohabitent. Les systèmes de murs-rideaux ventilés peuvent économiser 30 à 40 % de la valeur de votre facture [48].

3.1. Protection acoustique :

Bonnes valeurs d'isolation acoustique obtenues grâce à une construction multicouche. La comparaison de l'indice d'isolation acoustique de différentes façades montre que les très bonnes valeurs sont obtenues pour les façades ventilées. De ventilation entre bardage et murs extérieurs peuvent également être réduits de 20 % bruit extérieur (Groupe Kobé, 2012)

3.2. Protection thermique :

* En hiver : L'isolation thermique extérieure permet d'avoir un périmètre isolé intégral – sans ponts thermiques au niveau des têtes de dalles et des parois de séparations (Flumroc, 2017,)

*En été : L'isolation uniforme protège également contre la chaleur estivale. L'espace de ventilation contribue à évacuer une part importante de cette chaleur indésirable et garantit que le revêtement de la façade ne chauffe pas exagérément. Le flux de chaleur vers l'intérieur s'en trouve réduit.

3.3. Inertie du mur :

La masse du mur extérieur augmente son inertie. Par exemple en cas d'arrêt momentané du chauffage, la température se régule dans les pièces après un certain temps.

3.4. Protection contre l'humidité :

L'humidité de construction ou une éventuelle humidité due aux intempéries et à la condensation est évacuée systématiquement par l'espace de ventilation.

*En plus d'autres avantages tels que la Protection d'incendie, élimination de la condensation, protection de la structure, accessibilité à la façade pour l'entretien ce qui permet la prolongation de la vie de la façade.

4. inconvénient des façades ventilées :

*Plus cher que les systèmes traditionnels.

*Possibilité de séparation, il faut donc analyser l'éventuelle séparation des plaques Et surveiller attentivement son installation.

*Vieillesse des matériaux, notamment dans les climats humides.

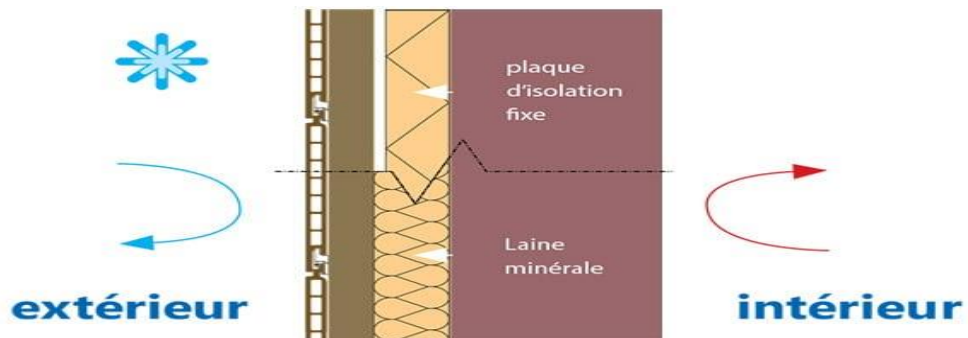
*Il existe un risque de transmission si des matériaux appropriés ne sont pas utilisés.

*Les incendies se produisent à travers les chambres à air situées entre les étages.

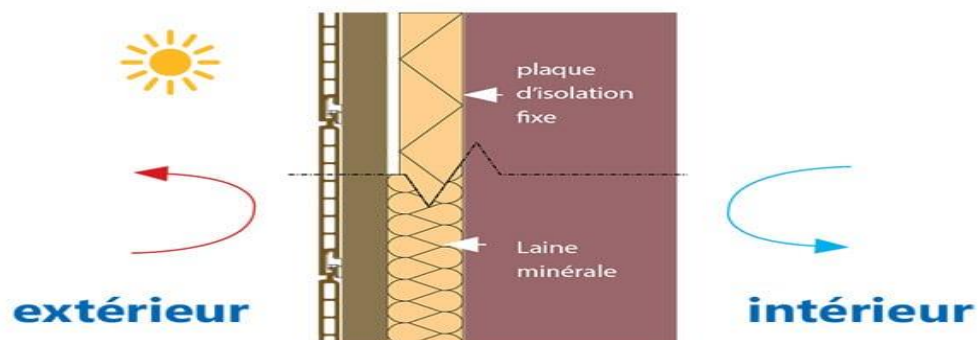
5. efficacité énergétique de la façade ventilée :

La façade ventilée offre une solution efficace pour répondre aux normes en matière d'efficacité énergétique, que ce soit lors de la construction initiale d'un bâtiment ou lors de sa rénovation. Elle crée un véritable "bouclier thermique" en protégeant le bâtiment de la chaleur grâce à la circulation constante d'air à température ambiante le long de la surface extérieure de l'isolant.

En été, la façade ventilée joue un rôle crucial en maintenant un écart thermique, limitant ainsi la pénétration de la chaleur à l'intérieur du bâtiment. Cela permet de réduire la surchauffe intérieure pendant les périodes chaudes et de profiter des heures où la température extérieure est plus fraîche. Pendant l'hiver, elle contribue à ralentir le processus de refroidissement des murs, ce qui est essentiel pour maintenir une température intérieure confortable et réduire les besoins en chauffage.[49]



Bardage isolé et ventilé qui maintient la chaleur à l'intérieur et l'air froid à l'extérieur en hiver



Bardage isolé et ventilé qui maintient la chaleur à l'extérieur et la fraîcheur à l'intérieur en été.

Figure 11.1: schéma représente le fonctionnement de la façade ventilée en hiver et en été

6. Quels sont les éléments à prendre en compte pour une façade ventilée ?

Lors de la conception d'une construction, il est essentiel de reconnaître que la mise en place d'une façade ventilée constitue une solution structurelle complexe. Il est impératif de l'aborder en accord avec les normes du design industriel. Cela signifie qu'il est crucial d'examiner et de définir tous les détails en amont pour éviter d'éventuelles modifications ultérieures ou des ajustements improvisés lors de la phase d'assemblage.

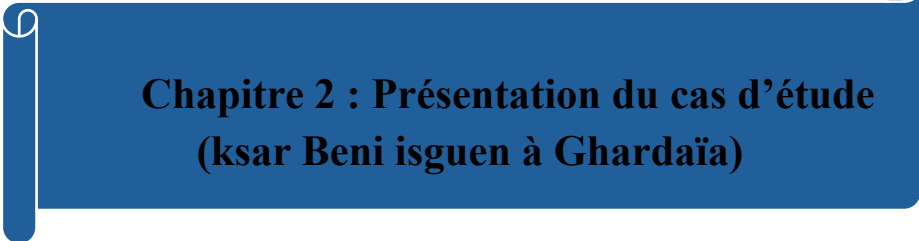
Les considérations à suivre pour projeter une façade ventilée sont :

*L'analyse du design et du projet architectural pour le revêtement du bâtiment est essentielle. Cela inclut l'évaluation de la faisabilité de la façade, la sélection du système et des carreaux appropriés, ainsi que la prise en compte d'un joint de ventilation d'une épaisseur de 4 à 8 mm entre les carreaux

*Une décision cruciale en matière de design qui influence l'aspect final de la façade est le choix du système, qu'il soit avec des agrafes visibles ou invisibles

Conclusion :

La façade représente l'image d'un bâtiment. La façade ventilée est un dispositif de protection qu'est considéré comme une solution passive appropriée pour la rénovation et les nouveaux bâtiments afin de qualifier la qualité de confort thermique, réduire la consommation énergétique et donner un aspect esthétique à la façade avec une grande variété des choix relatifs aux matériaux, aux couleurs et textures ainsi qu'aux dimensions des composants diverses. La façade ventilée constitue une excellente réponse pour la gestion et la maîtrise de l'interaction entre l'atmosphère intérieure et l'espace extérieur où la section extérieure travaille comme couche qui protège la construction. Grâce au système de chambre d'air entre la céramique et le mur du bâtiment. Par temps chaud, il permet de réduire la suppression de chaleur et par temps froid, il permet la réduction la dispersion de chaleur à l'intérieur, toute l'année.

A dark blue rectangular box with rounded corners. The left side features a white scroll-like graphic. The text is centered within the box.

**Chapitre 2 : Présentation du cas d'étude
(ksar Beni isguen à Ghardaïa)**



1. Introduction :

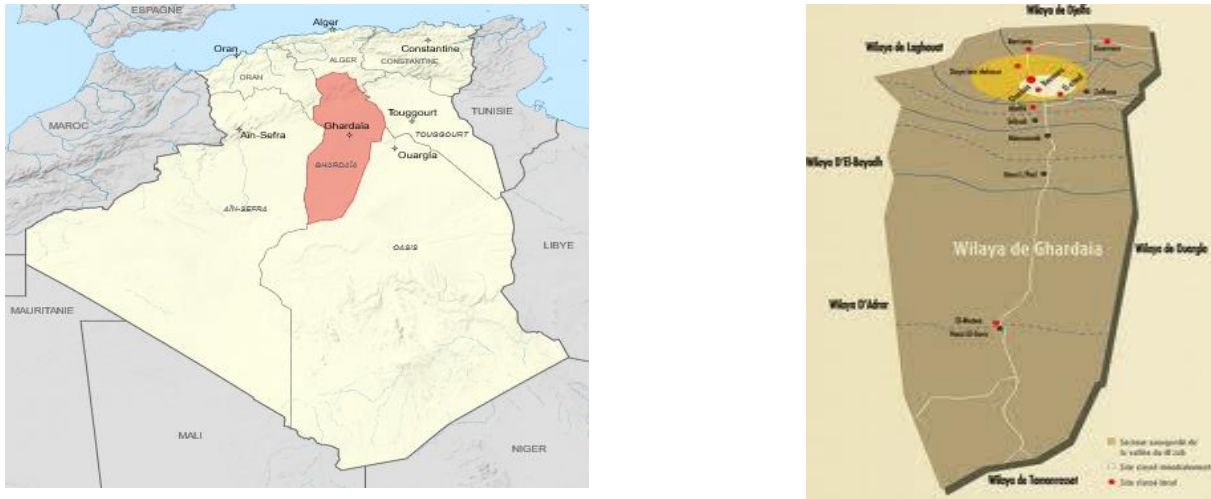
« Tout concepteur a besoin de connaître le climat du lieu où il doit construire. C'est-à-dire le régime de la température et de l'humidité de l'air, le régime et la nature des Précipitations, l'ensoleillement, le régime et la nature des vents durant le cycle annuel Complet ». (Fernandez et Lavigne 2009).

Dans cette perspective, la connaissance du climat de la région objet d'étude avec ses caractérisations météorologiques et ses variations permet de comprendre son impact sur le confort de l'être humain dans le bâtiment.

Dans ce chapitre, on abordera une étude climatique de la ville de Ghardaïa, Algérie (cas d'étude). Cette analyse est élaborée pour définir la zone de confort, de même que ses limites et différents éléments de conception architecturale influant sur le confort thermique.

2. Caractéristiques générales de la ville de Ghardaïa :

La région de Ghardaïa (32,4°N, 3,8°E) est située à 600 km de la côte, à une altitude de 450 m. Elle est influencée par un climat sec. Ce climat est caractérisé par une pluviométrie très faible (160 mm/an), des températures très élevées en été et basses en hiver. En été, les températures peuvent atteindre jusqu'à 45°C en journée et descendre à 20°C la nuit, ce qui crée une grande amplitude thermique diurne. En hiver, les températures varient de 24°C à 0°C, avec une température moyenne de 10,4°C en janvier. Les températures sont plus modérées en hiver qu'en été, avec une amplitude thermique maximale mensuelle avoisinant les 20°C en été. Le rayonnement solaire est intense tout au long de l'année, avec un pic de 1 000 W/m² en été. En raison de ces conditions climatiques sahariennes, l'isolation est essentielle dans la construction et des stratégies d'adaptation au changement climatique ont été développées pour faire face aux températures élevées. Dans la région de Ghardaïa, la pierre est le matériau de construction principal. Il est utilisé depuis des siècles (depuis la fondation de la ville à 1200 J) en raison de leur disponibilité et aussi du manque d'autres matériaux de construction comme le bois (la végétation est faible en raison du climat).[40]



3. Critères de choix du site d'intervention :

Ghar daya (la grotte de daya) sous le signe de la légende, c'est une histoire d'une fille qui s'appelle Daya qui vivait seule dans une grotte. La ville de Ghardaïa représente la capitale du Mzab est l'une des plus importantes villes du sud de l'Algérie. Ghardaïa offre un terrain d'étude riche et diversifié sur plusieurs fronts :

- *Située au cœur du Sahara algérien, l'étude des conditions géographiques et climatiques de la région offre un aperçu des caractéristiques uniques du désert et de ses impacts sur l'environnement local

- *Renommée pour son architecture traditionnelle et son héritage culturel berbère, Ghardaïa offre une occasion d'explorer l'histoire, la culture, les traditions et les pratiques sociales spécifiques à cette région.

- *Attirant de nombreux visiteurs en raison de son architecture unique, de ses oasis et de son patrimoine culturel, Ghardaïa est également propice à l'étude des tendances touristiques, de l'impact économique du tourisme et des stratégies de durabilité touristique.

- *les problèmes urbanismes de la ville : manque des équipements du confort thermique

4. Etudes climatiques :

À Ghardaïa, les étés sont caniculaires, aride et dégagé et les hivers sont frisquet, sec, venteux et dégagé dans l'ensemble. Au cours de l'année, la température varie généralement de 6 °C à 40 °C et est rarement inférieure à 3 °C ou supérieure à 43 °C.

La saison très chaude dure 3,1 mois, du 6 juin au 11 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 35 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Ghardaïa est juillet, avec une température moyenne maximale de 40,5 °C et minimale de 29,5 °C.

La saison fraîche dure 3,7 mois, du 17 novembre au 6 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 20 °C. Le mois le plus froid de l'année à Ghardaïa est janvier, avec une température moyenne minimale de 6,7 °C et maximale de 15,3 °C. [41]

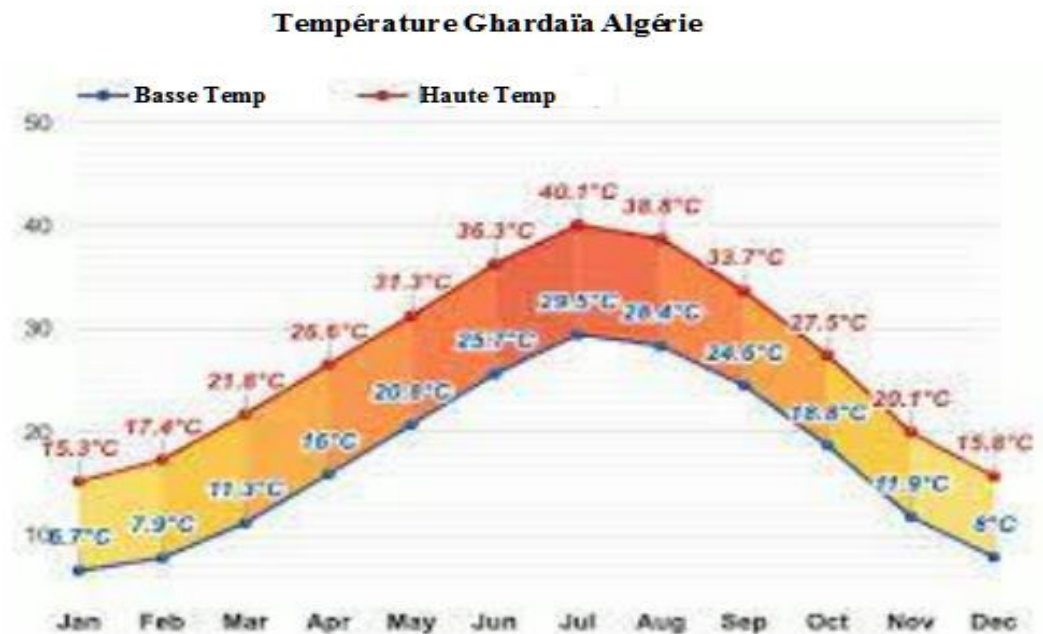


Figure 2.2: Moyenne haute et basse température [60]

4.1. Température :

La figure ci-dessous montre une caractérisation compacte des températures horaires moyennes pour toute l'année. L'axe horizontal représente le jour de l'année, l'axe vertical l'heure du jour, et la couleur représente la température moyenne pour cette heure et ce jour [42]

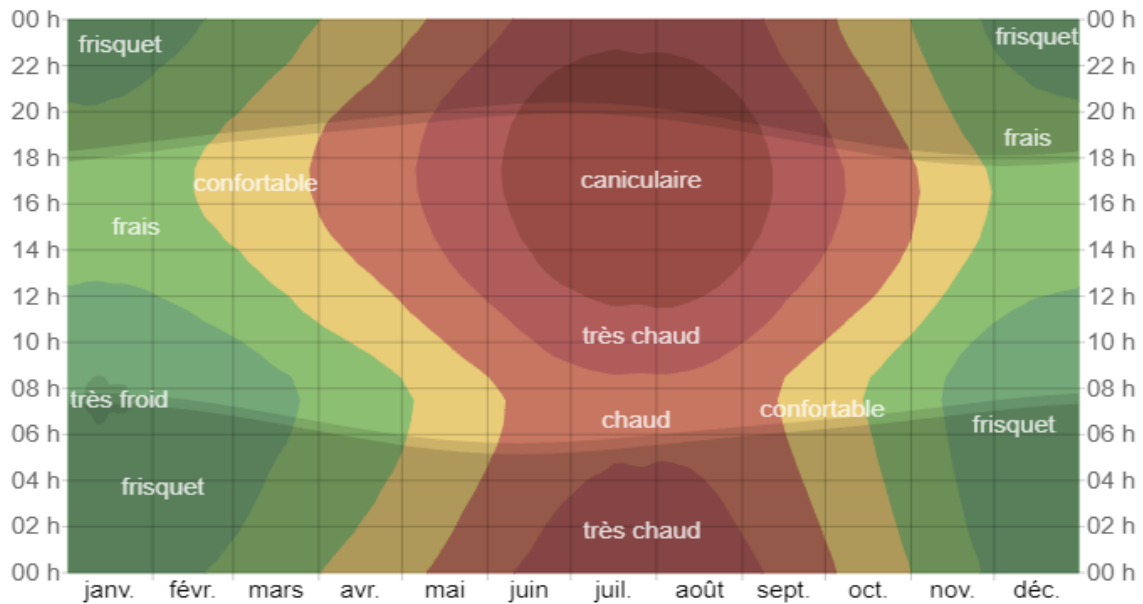


Figure 12: Température horaire moyenne à Ghardaïa [60]

4.2. Précipitation :

Ghardaïa connaît une variation saisonnière minime en termes de fréquence des jours de précipitation (c'est-à-dire les jours connaissant une précipitation d'eau ou mesurée en eau supérieure à 1 millimètre). La fréquence varie de 1 % à 6 %, avec une valeur moyenne de 3 %.

Pour les jours de précipitation, nous distinguons les jours avec pluie seulement, neige seulement ou un mélange des deux. Le mois avec le plus grand nombre de jours de pluie seulement à Ghardaïa est septembre, avec une moyenne de 1,5 jour. En fonction de ce classement, la forme de précipitation la plus courante au cours de l'année est de la pluie seulement, avec une probabilité culminant à 6 % le 3 octobre

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Ghardaïa connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles.

Chutes de pluie au cours de l'année à Ghardaïa. Le mois le plus pluvieux à Ghardaïa est novembre, avec une chute de pluie moyenne de 8 millimètres.

Le mois le moins pluvieux à Ghardaïa est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 1 millimètre [42]

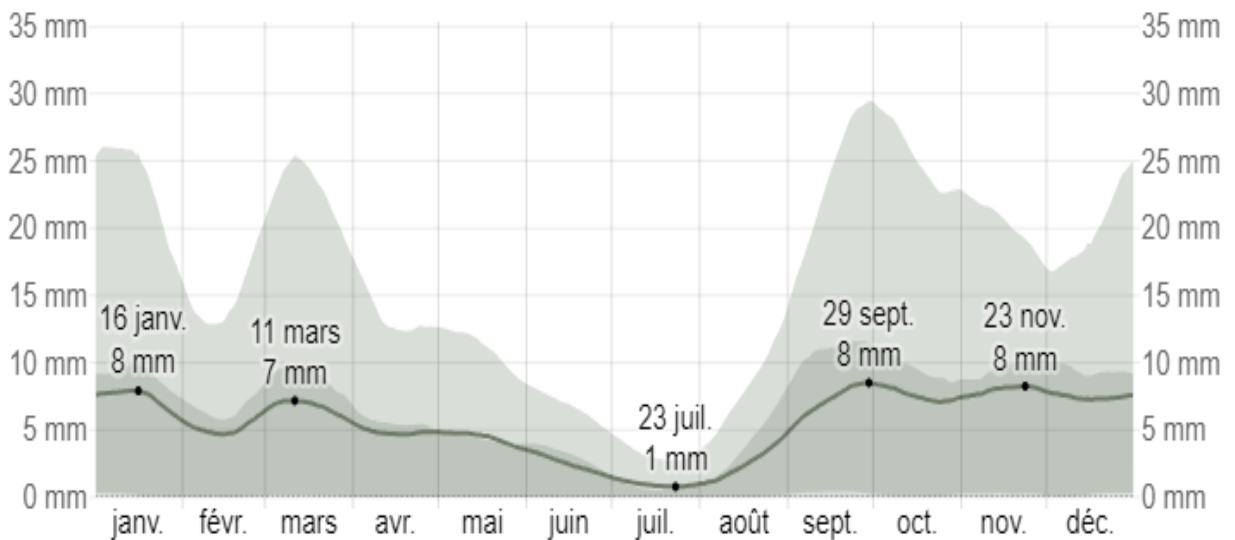


Figure 4.2: précipitation mensuelles moyennes à Ghardaïa [60]

4.3. Vent :

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Ghardaïa connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 6,3 mois, du 31 décembre au 10 juillet, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 14,9 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Ghardaïa est avril, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 16,5 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 5,7 mois, du 10 juillet au 31 décembre. Le mois le plus calme de l'année à Ghardaïa est octobre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 13,4 kilomètres par heure [42]

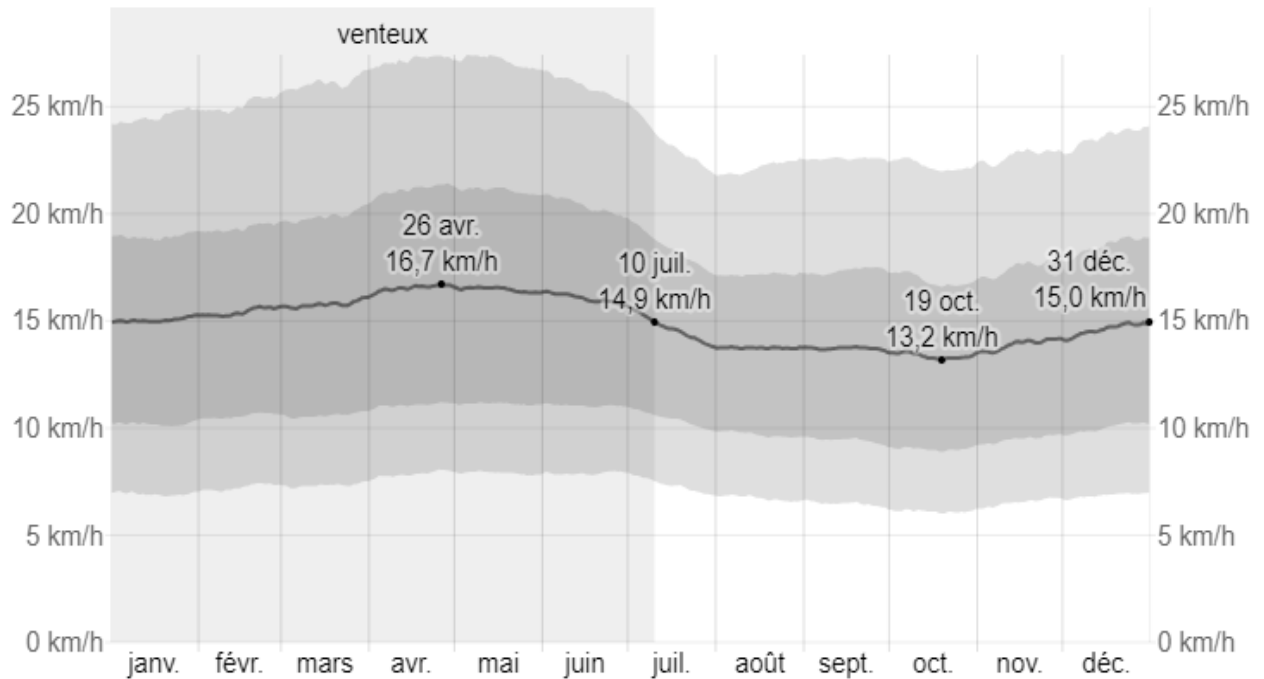


Figure5.2 : Vitesse moyenne du vent à Ghardaïa [60]

4.4. Rayonnement solaire :

Cette section traite du rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien total atteignant la surface du sol sur une zone étendue, en tenant pleinement compte des variations saisonnières sur la longueur du jour, de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, de l'absorption par les nuages et d'autres composantes atmosphériques. Le rayonnement en ondes courtes inclut la lumière visible et le rayonnement ultraviolet. Le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année.

La période la plus lumineuse de l'année dure 4,3 mois, du 13 avril au 22 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 7,0 kWh. Le mois de l'année le plus lumineux à Ghardaïa est juin, avec une moyenne de 7,9 kWh.

La période la plus sombre de l'année dure 3,1 mois, du 31 octobre au 3 février, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré inférieur à 4,3 kWh. Le mois de l'année le plus sombre à Ghardaïa est décembre, avec une moyenne de 3,4 kWh.[42]

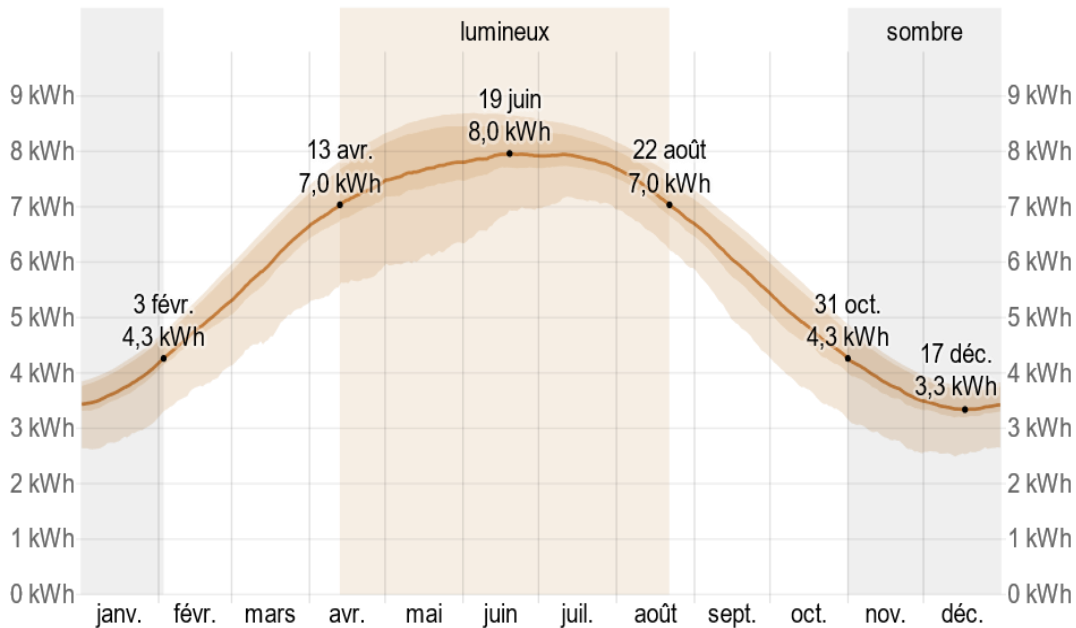


Figure 6.2: Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à Ghardaïa [60]

5. La réglementation thermique en Algérie :

De nombreux pays se sont efforcés de gérer l'énergie dans le secteur du bâtiment par le biais de diverses lois et réglementations, en se concentrant d'abord sur l'amélioration de l'isolation des murs, puis en l'étendant à l'ensemble du système thermique du bâtiment. Ces lois ont entraîné une réduction significative de la consommation d'énergie dans les pays qui les ont appliquées, ce qui a incité de nombreux autres pays à suivre cette méthode, y compris l'Algérie.

Le premier code algérien de l'énergie pour les bâtiments a été publié en août 1999 (N°99-09). Décrivant les mesures et les procédures visant à rationaliser la consommation d'énergie. Un décret exécutif a ensuite été publié sur les réglementations thermiques pour les nouveaux bâtiments en 2000 (N°2000-90).

La réglementation thermique en vigueur en Algérie est la DTR C3.2/4. La vérification de la conformité d'un bâtiment à cette nouvelle réglementation doit être effectuée séparément pour les saisons d'hiver et d'été.

Une nouvelle réglementation thermique est prévue dans le but de réduire la consommation de chauffage d'environ 25%, afin de promouvoir l'efficacité énergétique et de réduire l'impact environnemental des bâtiments, tout en assurant un confort thermique adéquat pour les occupants. À cette fin, des simulations numériques ont été réalisées sur des habitations typiques, montrant que simplement en limitant les pertes de chaleur par transmission, cet

objectif peut être atteint, tout en réduisant de manière significative le besoin de climatisation en été. [43]

6. Situation géographique du cas d'étude

Le Ksar de Beni Isguen ($32^{\circ}28'40.2''$ N, $5^{\circ}20'25.4''$ A l'est) est l'un des neuf palais de la wilaya de Ghardaïa et des cinq Ksar de la vallée du M'zab, située au sommet d'une colline rocheuse à une altitude d'environ 450 mètres [63]. Il est situé entre le Ksar Malika et le Ksar Bounoura, au carrefour des vallées du Mzab et N'tissa. Le Ksar Beni Isguen se trouve à 600 kilomètres au sud d'Alger et à 4 kilomètres à l'ouest de Ghardaïa, et fait partie administrativement de la commune de Bounoura. Le ksar possède deux portes principales au nord-est et au sud-ouest, reliées par une rue, ainsi que trois autres portes menant aux différents cimetières. [43]



Figure 7.2: Plan de situation du cas d'étude.

6.1. L'emplacement de cas d'étude

- Au nord : Place publique « Rostomia », Gendarmerie et les logements.
- Au sud : Centre culturel El Hadj Maarouf.
- À l'est : Ecole Coranique et les longemts.
- À l'ouest : Station de Transport, Talmt mosquée.

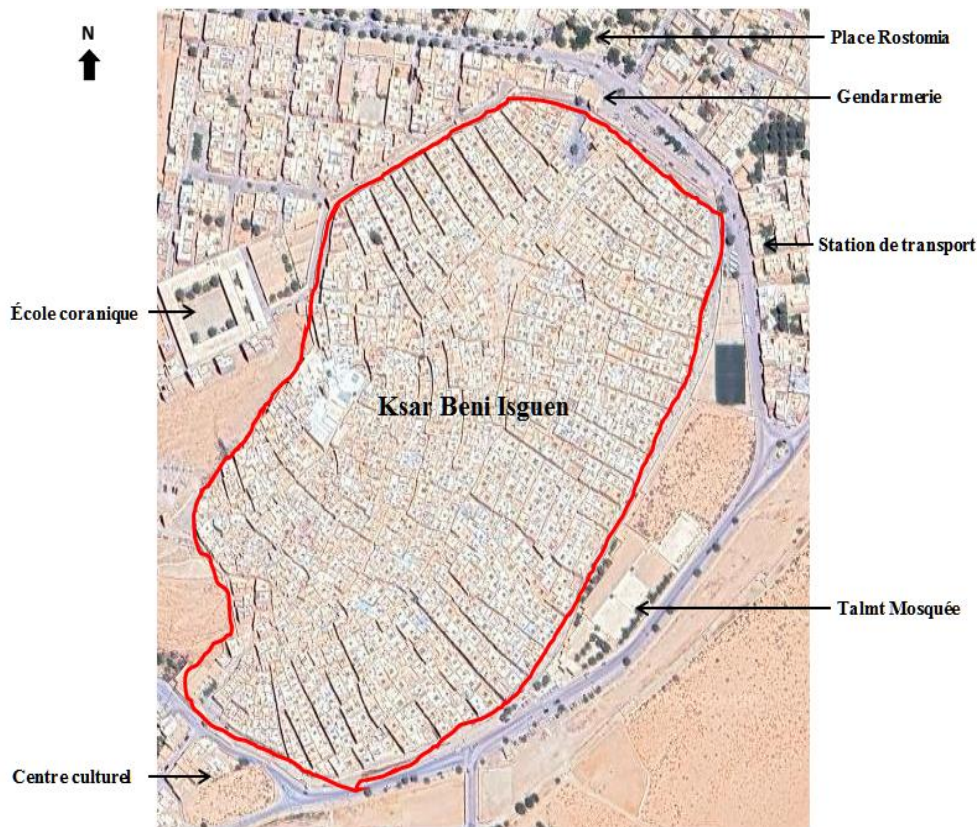


Figure 8.2: Plan de limite du cas d'étude [61]

7. présentation de cas d'étude :

L'étude de cas est basée sur une maison de 144 m² située dans le quartier de Beni Isguen (ksar). Il a une seule façade orientée au nord à partir de laquelle il y a la seule entrée à la maison (skiffa). La surface de la façade est petite, ce qui réduit l'exposition à un soleil intense. Les maisons du Ksar de Beni Isguen se caractérisent par l'existence d'une cave, d'un rez-de-chaussée, d'un étage et terrasse.

*explication de la conception :

Plan de RDC :

Une entrée en chicane (skiffa ou taskift) : marquée par un seuil qui consiste la limite entre le monde extérieur des hommes et celui des femmes, elle conçue d'une façon ou même si la porte est ouverte le passager ne peut pas voir ce qui se passe à l'intérieur.

Un salon d'homme : avec une entrée indépendante qui se trouve près de l'entrée.

Wast eddar : l'espace central de la maison qu'est le plus vaste avec un chebek qui sert à ventiler et à éclairer. Il a un rôle de distribution des espaces, mais c'est aussi l'espace où se déroule l'ensemble des activités domestiques de la journée, autour de lui se trouvent les chambres, le salon des femmes, la cuisine et les sanitaires.

Chapitre 2 : présentation du cas d'étude (ksar Beni isguen à Ghardaïa)

Plan étage :

Une cage d'escalier qui mène au premier étage dont on trouve l'Aali une extension de salon d'homme, les restes des chambres.

Plan de terrasse :

Un espace ik Amor, buanderie et la terrasse. On trouve un acrotère de 1,5m pour l'intimité des habitations.

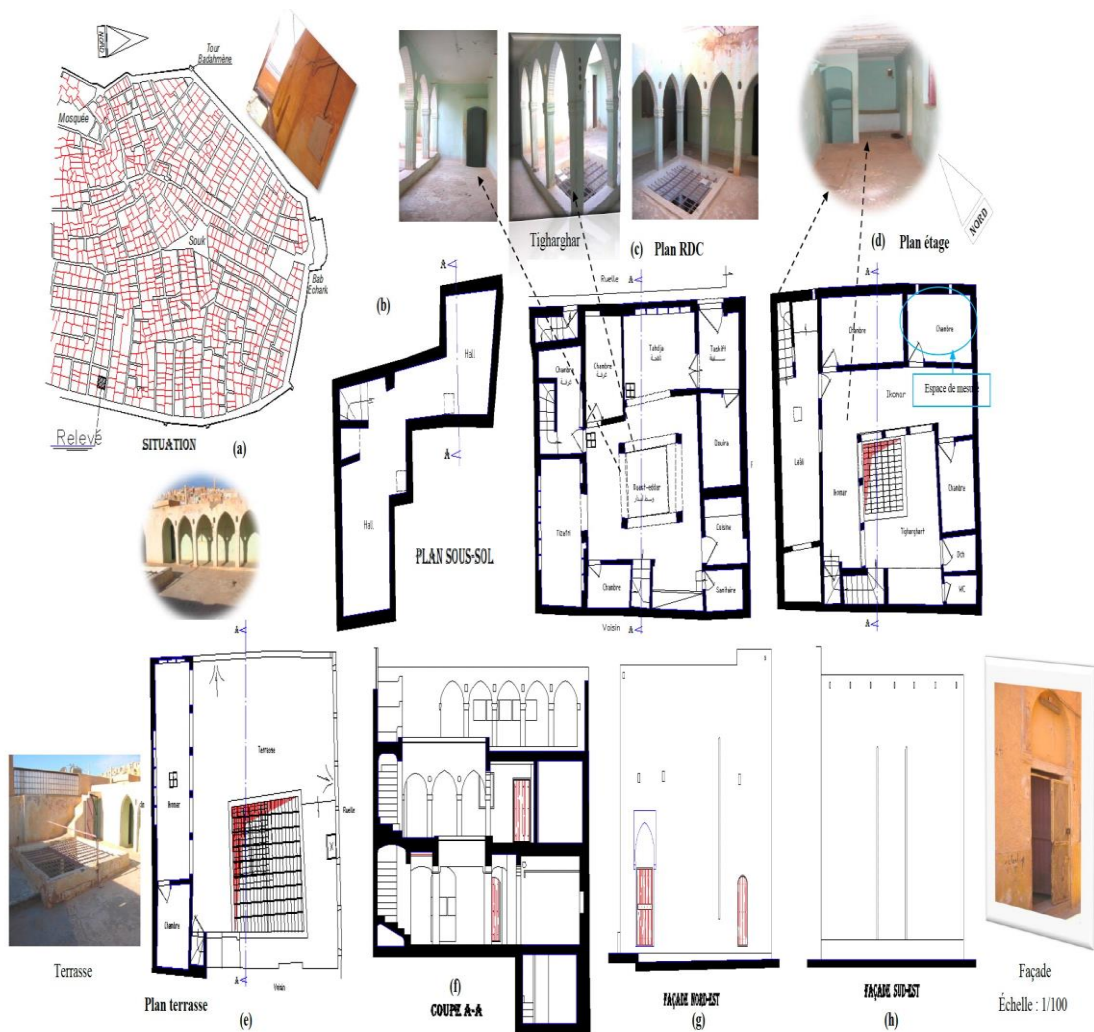


Figure 9.2 : plan de la maison d'étude

8. les matériaux de construction :

Les techniques ainsi que les matériaux de construction sont purement locales, utilisés pour la construction des ksour à Ghardaïa, afin de minimiser le cout de réalisation et la protection de l'environnement.

Des murs porteurs en moellon de pierre locale avec mortier à base de sable et de chaux locale (timchent), des planchers en pierres locale à ossature de tronc palmier, des revêtements et finitions sont en timchent et sable coloré.

Tableau 3 : caractéristiques thermiques des matériaux des parois de la maison

	Composition	Epaisseur (cm)	Valeur de transmission thermique U (W/m.K)
Mur extérieurs (Voisins)	Pierre dures	38	1.34
	Mortier de chaux	4	
	Sable (mélangé avec de la chaux et de l'eau)	2	
Mur Intérieur (adjacents)	Pierre dures	20	2.65
	Mortier de chaux	2	
	Sable (mélangé avec de la chaux et de l'eau)	2	
Sol	Tronc de palmier	15 à 20	0.57
	Pierre	13	
	Mortier de Timchent (pour collage)	/	
	Terre (terre sèche)		
Toit	Tronc de palmier	15 à 20	0.53
	Pierre	13	
	Mortier de Timchent	/	
	Couche de terre	10	
	Chaux	5	

9. Modèle Mathématique :

Les équations décrivant le mouvement du fluide, issues des lois du principe fondamental de la dynamique. La résolution d'un problème de mécanique de fluide revient à déterminer en tout point et à tout instant les variables représentatives du fluide considéré, telles que : la pression, la masse volumique, les composantes de vitesse, la température, etc.

La définition des différentes variables, permet l'évaluation du mécanisme des transferts de chaleur et de masse. Ces variables sont liées entre elles par un système des coordonnées et du temps.

Les conditions aux limites et l'état initial, doivent être définies. La détermination des différents variables représentatives du fluide, nécessite un nombre d'équations égale au nombre de ces variables.

Le développement des principes de conservation, (MDF et thermodynamique), permet d'obtenir les équations de conservation : l'équation de la masse, les équations de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie.

Enfin comme dernière équation, on utilise une relation décrivant l'état du fluide reliant les différentes variables d'état. Les équations obtenues du bilan sont appliquées sur des éléments d'un volume de contrôle, choisit d'une façon représentative de l'espace discrétisé.

Lors de la modélisation d'un phénomène turbulent, qui est généralement le cas le plus proche de la réalité, on a besoin d'introduire des équations gouvernantes et représentatives de ce phénomène. Ceci implique la définition de nouveau inconnue qui décrit ce phénomène. La détermination de ces paramètres nécessite un bon choix du modèle de turbulence (modèles de fermeture).

9.1. Equations générales :

Le comportement de l'air du canal de la façade à double peau, est décrit par la résolution des champs de pression-vitesse et de température. Pour cela trois bilans sont nécessaires : équations de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

9.1.1. Equation de conservation de la masse :

A partir d'un bilan massique sur un volume élémentaire du fluide, qui possède à un instant donné une vitesse, une température, une pression et une masse volumique, on obtient :

l'équation de conservation de la masse. Cette équation décrit les caractéristiques et le comportement aéroulique d'une DSF à un instant donné. Elle s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$: Terme instationnaire de la variation locale de la masse en fonction du temps ;
- $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$: Variation convective due au champ de vitesses ;
- S_m : Terme sources ou puits, correspondant à la création ou à la disparition de la matière.

Dans l'absence du terme source, l'équation de conservation de la masse en coordonnées cartésiennes pour un fluide incompressible est donnée par :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Tel que u_i est la composante de la vitesse dans une direction donnée.

II.3.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement

Lors du mouvement du fluide, les forces extérieures sont de deux formes : les forces volumiques, (gravité à titre d'exemple) et les forces surfacique, (pression normales et frottement). L'équilibre entre les forces et la variation de la quantité de mouvement, (le taux de variation de la quantité de mouvement est égal à la résultante des forces extérieures qui lui sont appliquées), qui représente le principe fondamental de la dynamique, loi d'Euler, permet d'écrire les équations de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla (\rho \vec{u} \vec{u})$: Forces d'inerties ;

∇p : Forces de pression hydrostatique ;

$\nabla \cdot (\vec{\tau})$: Forces visqueuses ;

$\rho \vec{g}$: Force de gravité ;

\vec{F} : Toutes les forces volumiques à part la force de gravité,

Notons que : $\vec{\tau}$ est le tenseur des contraintes visqueuses, définit par :

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \quad (\text{II.4})$$

Avec : I est la matrice identité.

Généralement, les équations de conservation de quantité de mouvement (II.3), sont présentées par les équations de Navier-Stokes. Lorsque la viscosité dynamique moléculaire, (μ), du fluide est invariable dans toutes les directions du domaine d'étude, on aura la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (\text{II.5})$$

Donc, pour un fluide soumis uniquement au champ de pesanteur, la forme indicielle de cette équation est donnée par :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho g_i \delta_{ij} + F_i \quad (\text{II.5.a})$$

Avec δ_{ij} égal à 1 si : $i=j$, et égale à zéro autrement.

g_i : La j -ième composante du vecteur de gravité,

Les équations de quantité de mouvement ainsi que celle de conservation de la masse permettent de traiter les problèmes d'aérodynamique pure, c'est-à-dire, solution du champ de vitesses ou de pression, cependant, dans le cas du problème qui correspond par exemple au cas des DSF ventilées et exposées au rayonnement solaire direct, il faut introduire l'équation de l'énergie, afin de décrire l'évolution de la température de l'air du canal.

II.3. 3. Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est obtenue par application de la première loi de la thermodynamique sur un élément de volume. La variation d'énergie totale sur un volume élémentaire est la somme de la variation de l'énergie due à la conduction, la variation de la chaleur interne, la variation d'énergie due à l'effet de compressibilité et la variation de l'énergie de dissipation visqueuse, donc on peut écrire, Fluent [75] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) - \nabla \cdot (\sum_{m=1} h_m \vec{J}_m) + \nabla \cdot (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{u}) + S_h \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)$: Taux de variation de l'énergie interne ;

$\nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p))$: Taux de variation par convection, (présence du champ de vitesse) ;

$\nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T)$: Taux du transfert d'énergie par conduction ;

$\nabla \cdot (\sum_{m=1} h_m \vec{J}_m)$: Taux de la diffusion des espèces ;

$\nabla \cdot (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{u})$: Taux de variation de l'énergie dû à la dissipation visqueuse ;

S_h : Terme de source de chaleur volumique (électrique, chimique, mécanique...) ;

λ_{eff} : Conductivité thermique effective, donnée par:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t ;$$

Où : λ : Conductivité thermique moléculaire et λ_t conductivité thermique turbulente.

Le terme E dans l'équation (II.6), représente l'énergie interne du fluide, définit par :

$$E = h - \frac{p}{\rho} \quad (\text{II.7})$$

Dans le cas d'un gaz parfait incompressible, l'enthalpie est définie par :

$$h = C_p T + h_0 \quad (\text{II.8})$$

Avec,

C_p : Capacité calorifique, [J/kg.K]

h_0 : Enthalpie à la température de référence, [J/kg]

T_0 : Température de référence, [K],

On obtient la forme de l'énergie interne :

$$E = C_p T + h_0 - \frac{p}{\rho} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant l'équation (II.9), l'équation (II.6) devient :

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(C_p \rho T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \beta T \frac{DP}{Dt} + \mu \Phi + S_h \quad (\text{II.10})$$

Avec : Φ : fonction de dissipation visqueuse.

Chapitre 2 : présentation du cas d'étude (ksar Beni isguen à Ghardaïa)

Les équations (II.2), (II.5) et (II.10) forment un système de 5 équations où apparaît six inconnues : les trois composantes des vitesses (u_i : $i=1,2, 3$), la pression, la masse volumique et la température.

La résolution de ce système nécessite l'introduction d'une équation supplémentaire qui permet d'obtenir une relation entre la masse volumique, la température et la pression.

La solution la plus courante, lorsque les différences de la température à l'intérieur du canal son faible est l'approximation de Boussinesq (en convection naturelle).

Les fenêtres (Donnant sur la galerie du patio)	Surface :0.17m2 (0.59*0.29)	Type de vitrage : Simple Cadre : Area Cadre/fenêtre (%) :31.05	Valeur de transmission thermique U (W/m.K) : 5.74 Absorption solaire : 0.6
Infiltration	Renouvellement de l'air de ventilation (Vol/h) :0.5	Température de flux de l'air °C :28 °C	Humidité relative du flux d'air (%) :30
Ventilation	Renouvellement de l'air de ventilation (Vol/h) : 0.6	Température de flux de l'air °C :28	Humidité relative du flux d'air (%) : 30
Type de refroidissement	Température (°C) :28		
Type de chauff- fage	Température (°C) :21		
Gains internes	2 personnes : 75W/personne Eclairage artificiel : 10W/m ² Lumière fluorescente		

Conclusion :

Ghardaïa se caractérise par un climat désertique très dur en été, aride et très chaud avec des Températures annuelles moyennes de 21.8 °C. Selon les moyennes des températures Appréciables dans les dernières années, le mois de juillet est le plus chaud de l'année, avec une température moyenne de 40.5°C et des précipitations techniquement inexistantes.

Chapitre 2 : présentation du cas d'étude (ksar Beni isguen à Ghardaïa)

La ville de Ghardaïa possède ainsi un gisement solaire très important surtout en mois de juillet ou on peut aller jusqu'à 107.4 heures ensoleillée par an. Ces conditions climatiques dures influent gravement sur le comportement thermique des bâtiments, et par conséquent le confort des occupants de ces bâtiments. Sur ce point, il devient indispensable de traiter ces situations par des solutions passives et ou hybrides. Le recours aux techniques de refroidissement par évaporation, humidification, ventilation naturelle et masse thermique est absolument le seul refuge pour réduire l'inconfort dû à la température élevée et de l'humidité faible de cette période



Chapitre 3 : Interprétation des résultats



Introduction

L'architecture moderne utilise de plus en plus la simulation pour informer et diriger le processus de conception. Dans un monde en évolution où les préoccupations environnementales, la durabilité, le confort thermique et l'efficacité énergétique sont devenus des priorités, la simulation est devenue un outil indispensable pour les architectes et les ingénieurs. Ce chapitre approfondit l'interprétation des résultats de simulation dans le domaine de la construction. Il examine comment ces simulations sont effectuées, quelles données sont collectées et comment les résultats sont utilisés de manière stratégique pour guider les décisions de conception. En explorant cette approche fondamentale, nous découvrirons comment la simulation peut fournir une vision de l'avenir de nos maisons, nous permettant de prendre des décisions stratégiques qui créent des environnements plus durables, plus efficaces et axés sur le confort et le bien-être de leurs occupants.

1.Objectifs de la simulation :

L'objectif principale de ce travail de simulation est de déterminer l'impact réel de la façade ventilée en brique sur la consommation énergétique du chauffage et de la climatisation dans une unité d'habitation afin d'assurer des ambiances thermiques confortables

1.1. Présentation du logiciel Design Builder :

Design Builder est un programme de simulation de haute qualité, facile à utiliser, qui aide les architectes, ingénieurs, enseignants et chercheurs à évaluer la performance environnementale des bâtiments neufs et existants.

Les outils avancés de simulation de la performance des bâtiments de Design Builder permettent aux utilisateurs de gagner du temps et d'améliorer leur productivité lors de la modélisation par exemple la simulation énergétique basée sur le moteur (Energy Plus) qui permet de simuler la consommation d'énergie d'un bâtiment en prenant en compte divers facteurs tels que les systèmes CVC, l'occupation, les gains thermiques contrôlés par horaire, et la simulation CFD qui permet de calculer les flux d'air et la répartition des températures dans un local ou autour de bâtiments. [44].

Design Builder offre une gamme de fonctionnalités qui ne sont pas disponibles dans les logiciels co-courants [45]

- Calcul des déperditions/ apports thermiques de façades en hiver et en été.
- Évaluer les besoins du chauffage et du rafraichissement par ventilation naturelle

- Simulation dynamique (STD) (simulation énergétique basée sur le moteur (Energy Plus) et (CFD).
- Création d'un modèle 3D réaliste d'un bâtiment avec simulation des ombres (BIM)
- Gestion de l'occupation, ventilation, ouvertures, occultation, apports internes... paramétrables
- Economies d'énergie : free-cooling, récupération d'énergie, ventilation nocturne, gradation éclairage, régulation température

2.Evaluation de la performance de projet :

Notre travail consiste à la simulation d'une maison traditionnelle que on a conçue, à l'aide de logiciel design Builder pour voir si on a réussi de vérifier les hypothèses de départ :

2.1. Interface design Builder :

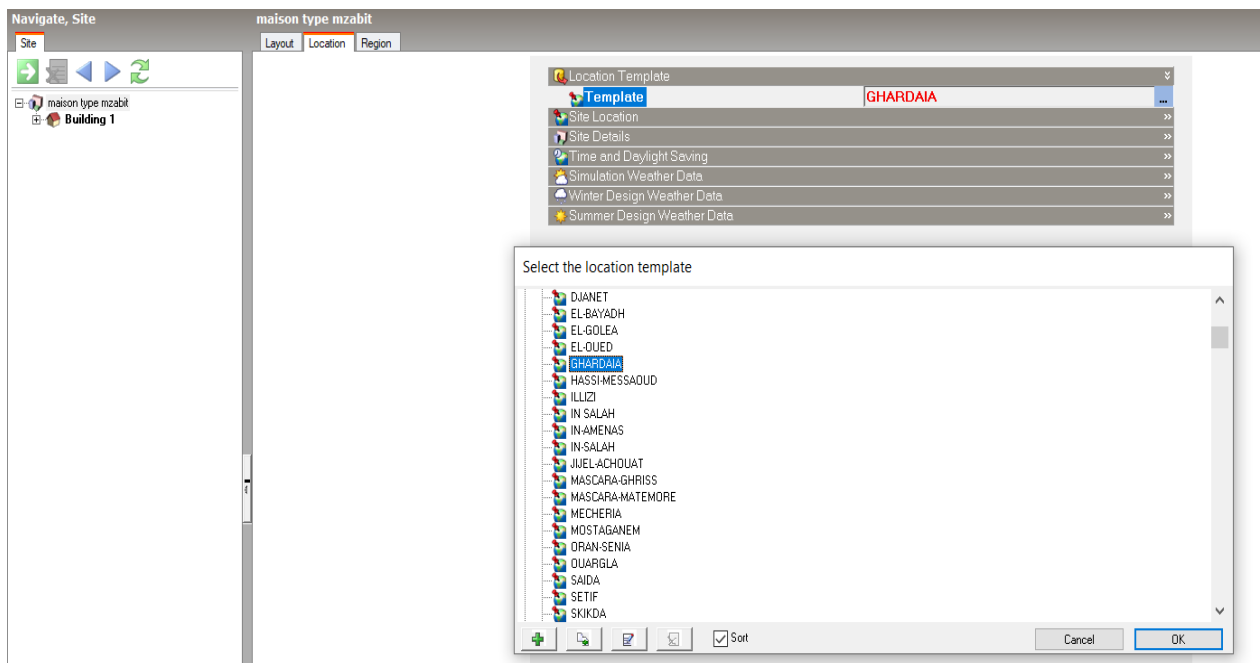


Figure 1.3: insertion de fichier climatique

2.2. Plan cas d'étude :

2.2.1. Plan sous-sol :

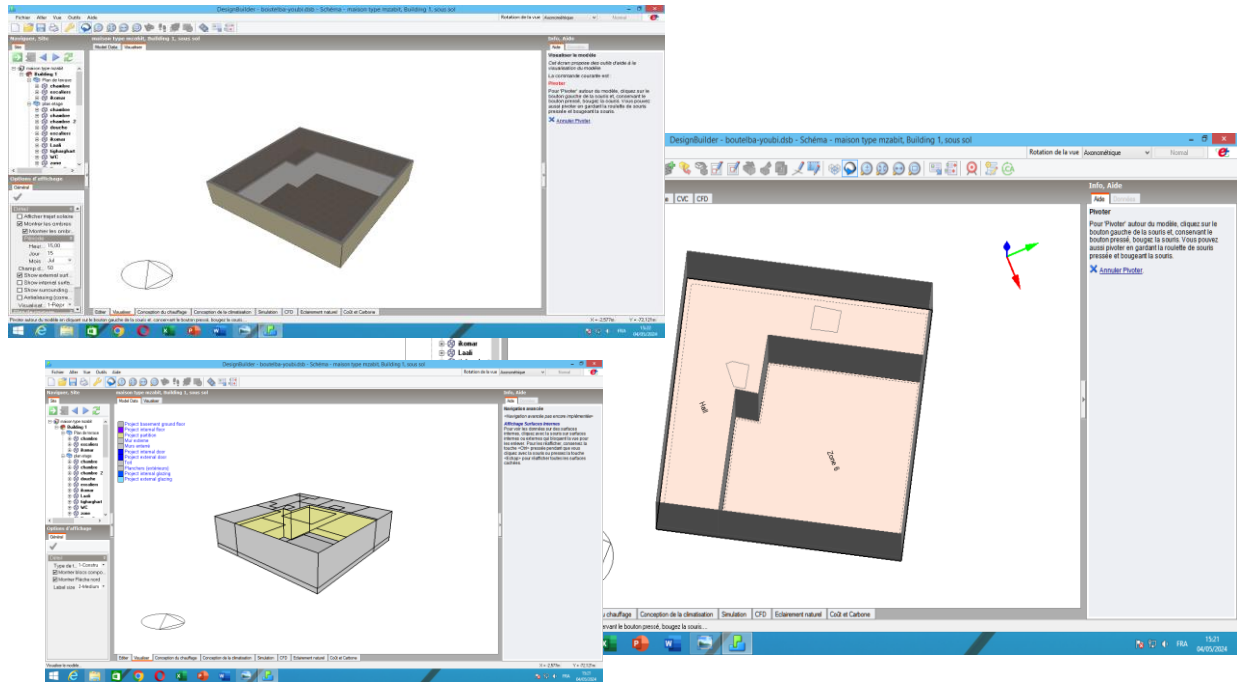


Figure 2.3 : schéma, model data et résultat 3D du sous-sol

2.2.2. Plan RDC :

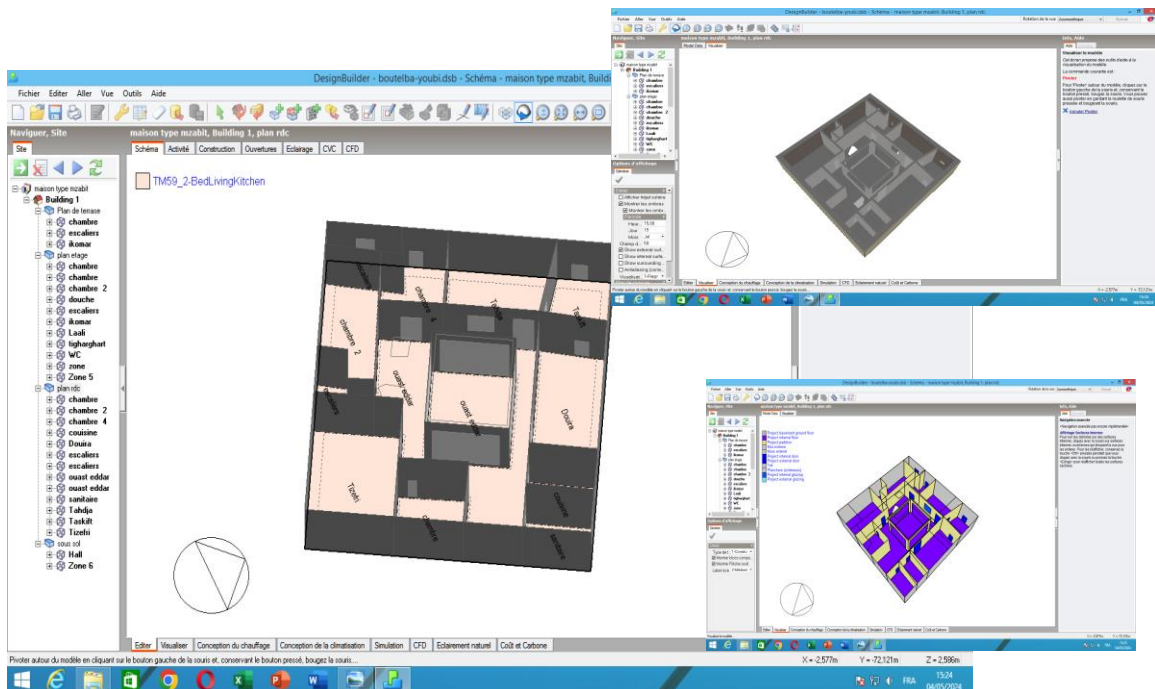


Figure 3.3: schéma, model data et résultat 3D du plan RDC

2.2.3. Plan d'étage :

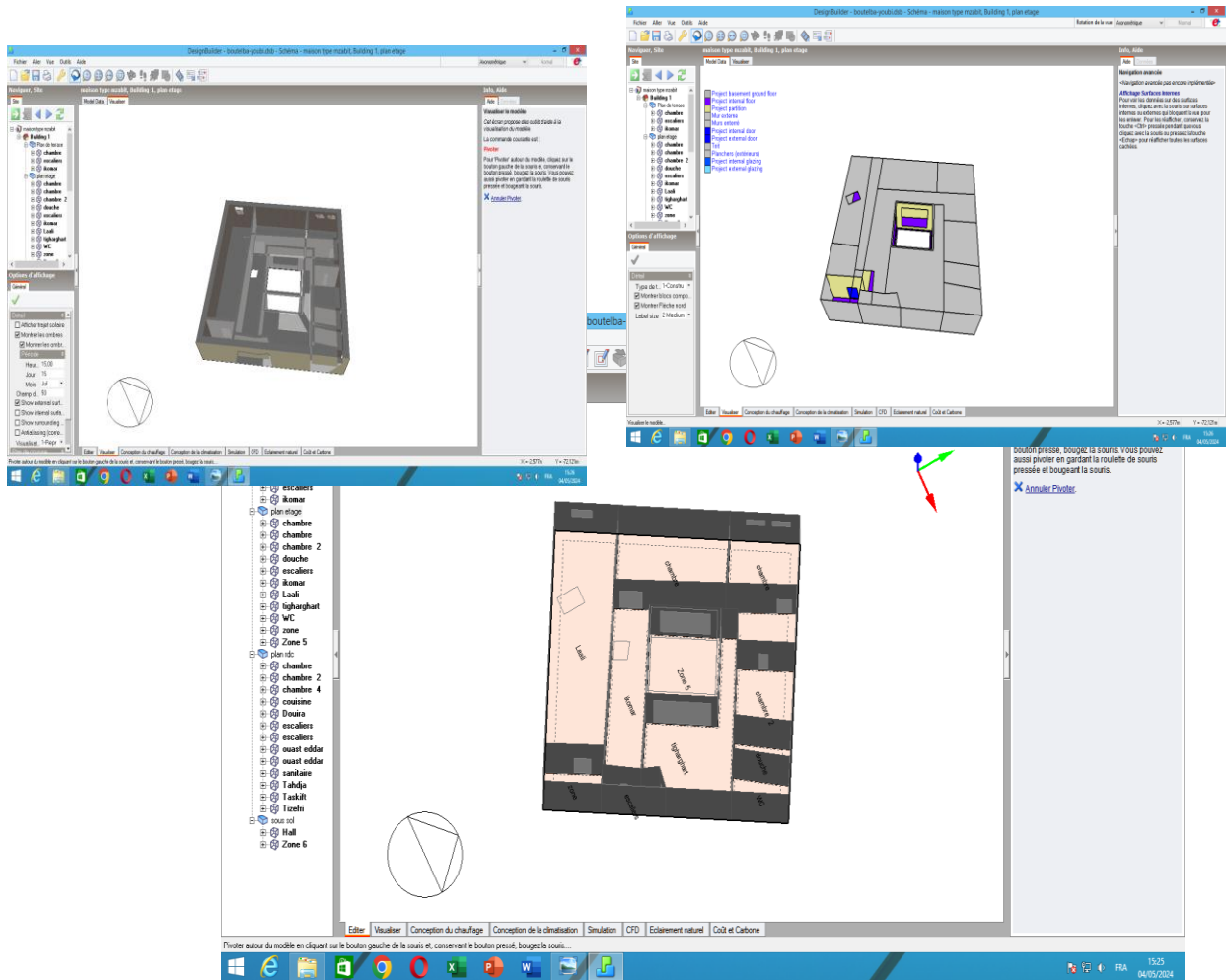


Figure4.3 : schéma, model data et résultat 3D de l'étage

2.2.4. Plan de la terrasse :

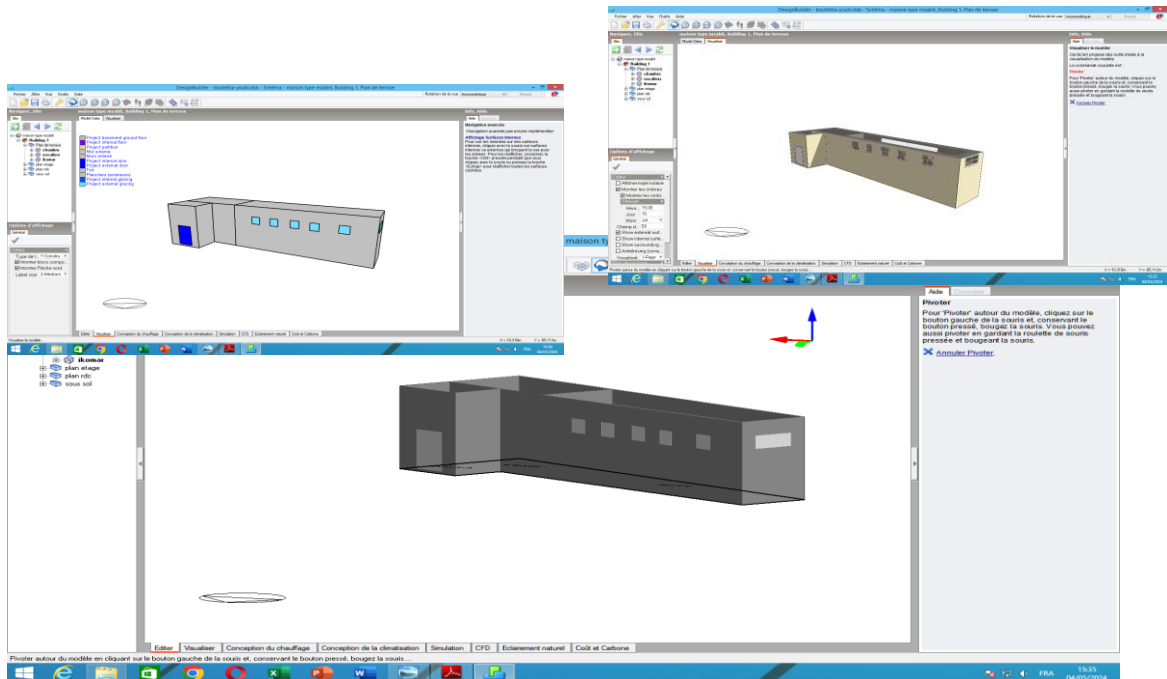


Figure 5.3: schéma, model data et résultat 3D de la terrasse

2.3. Résultats 3D du bâtiment :

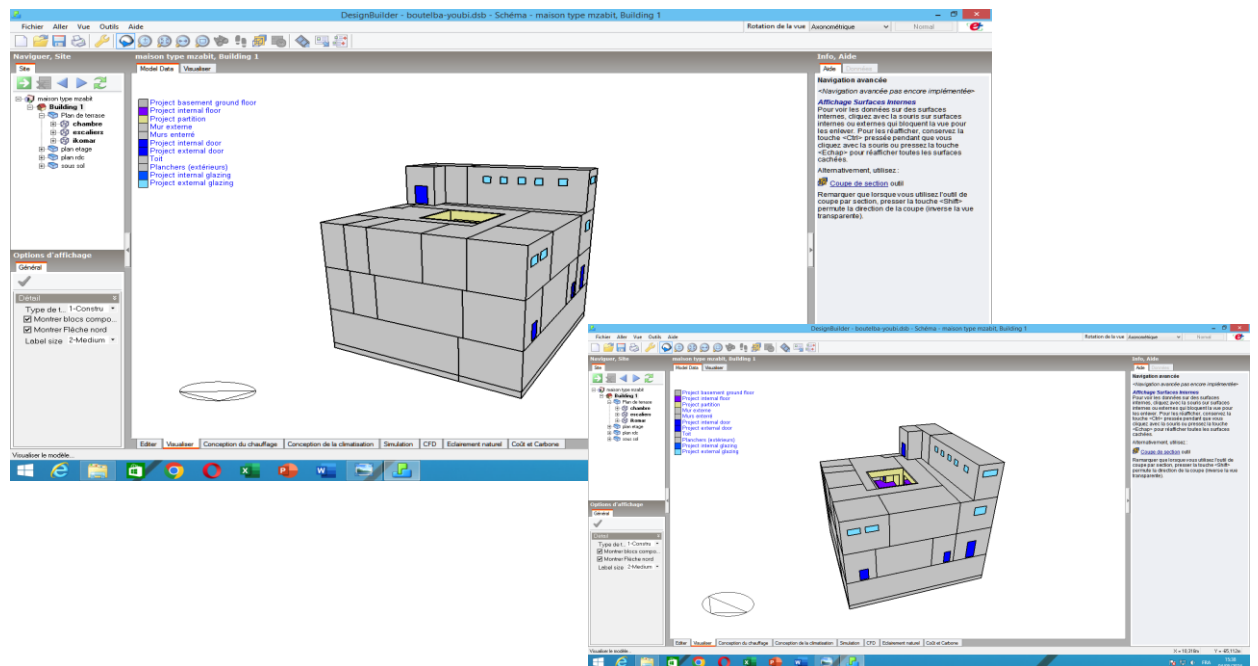


Figure 6.3 : model data et résultat 3D du bâtiment

Chapitre 3 : Interprétation des résultats

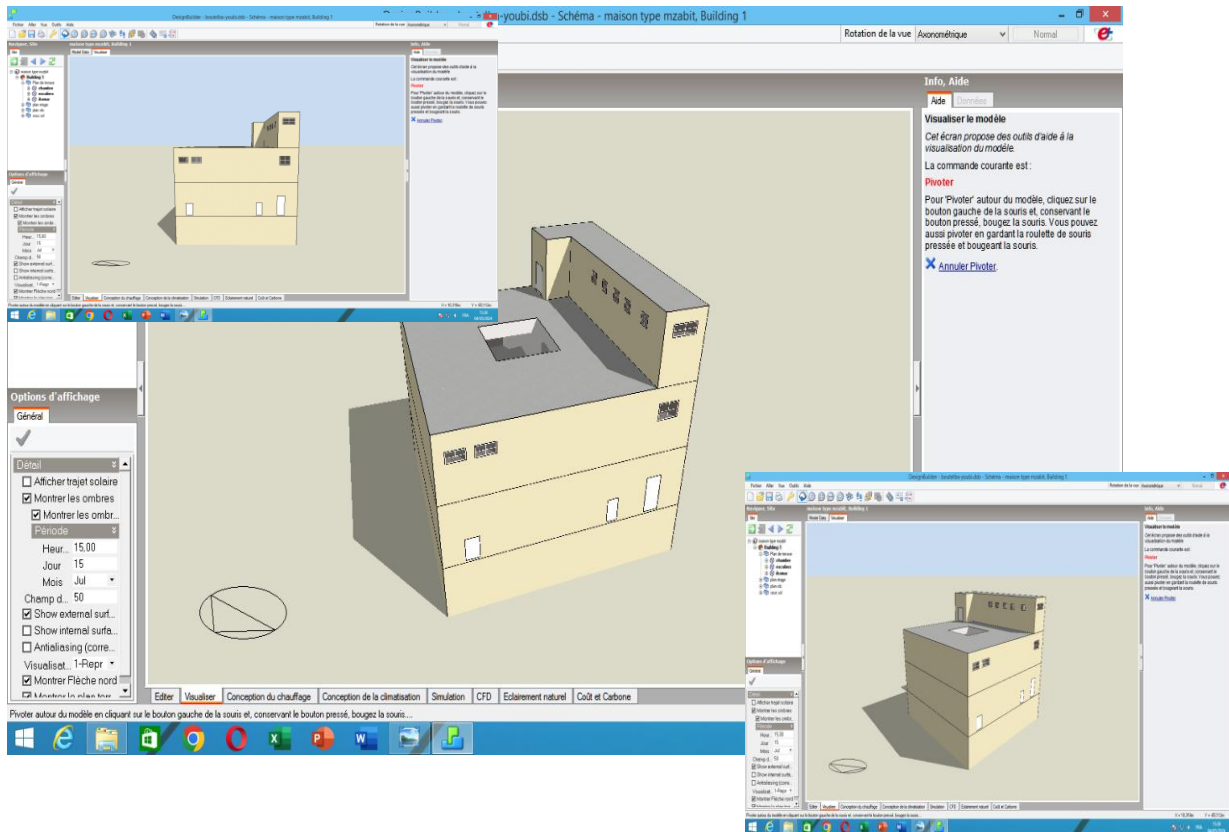


Figure 7.3: résultat de 3D du bâtiment

2.4. Matériaux du cas d'étude :

2.4.1. Mur extérieur :

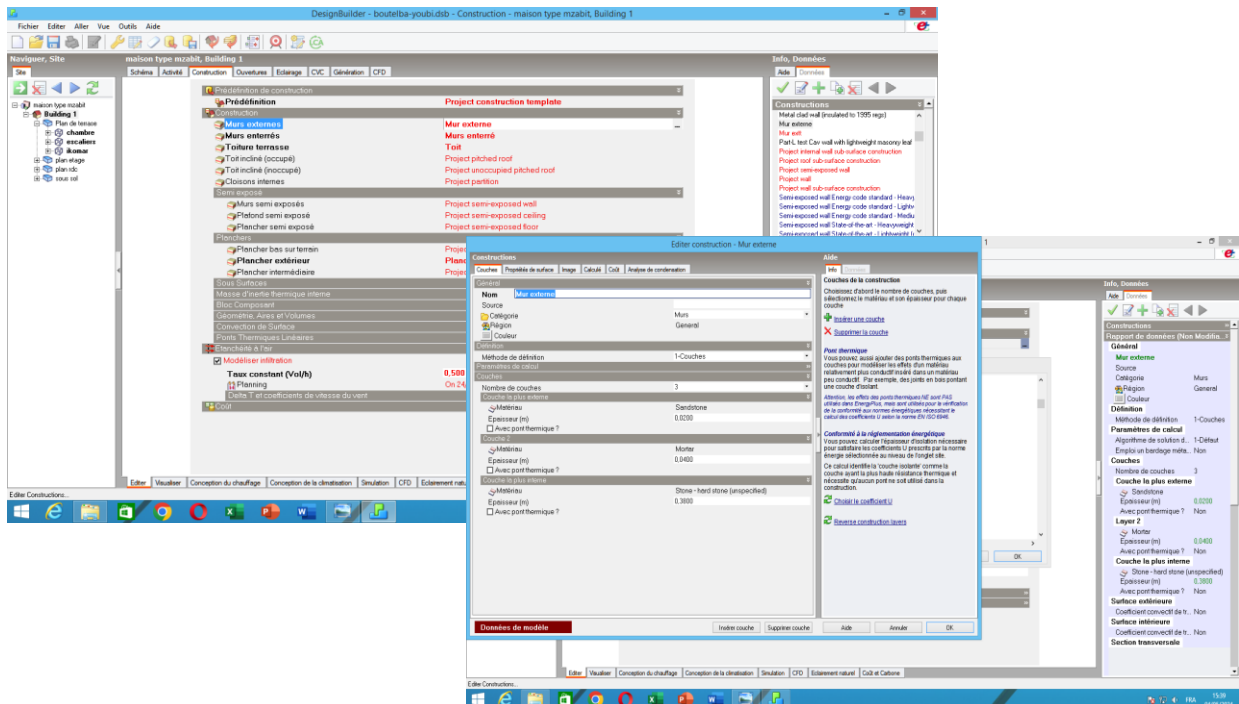


Figure 13: les caractéristiques du mur externe

2.4.2. Mur intérieur :

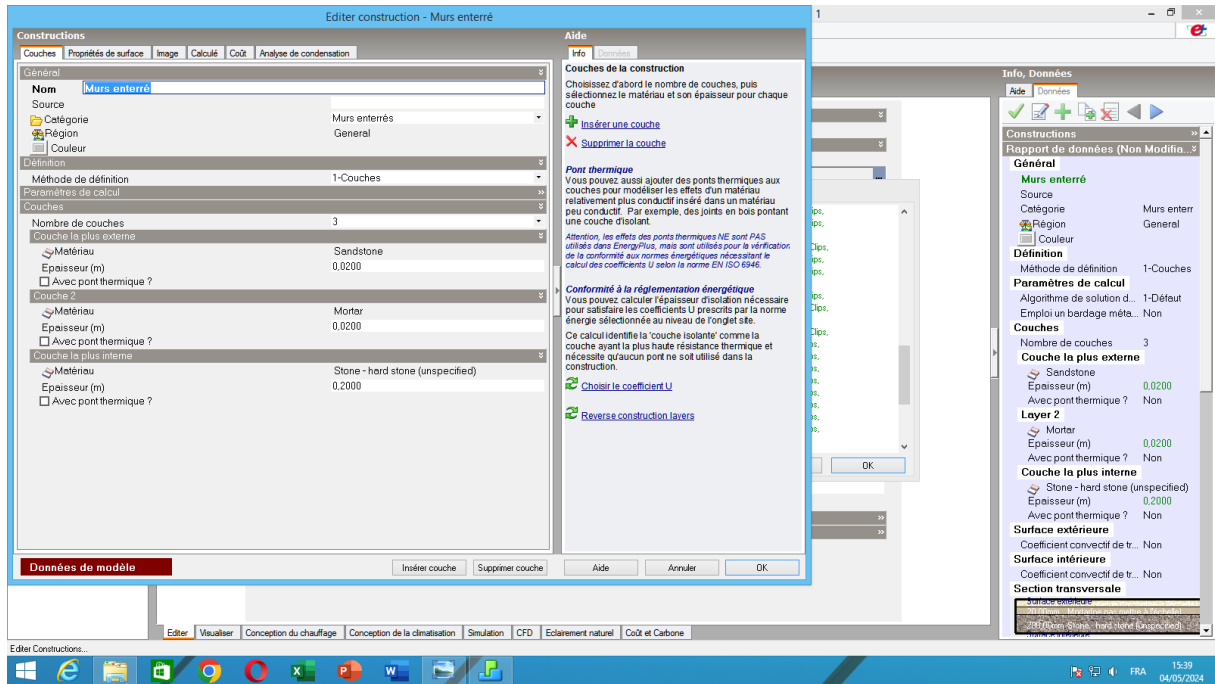


Figure 9.3: les caractéristiques du mur interne

2.4.3. Toit :

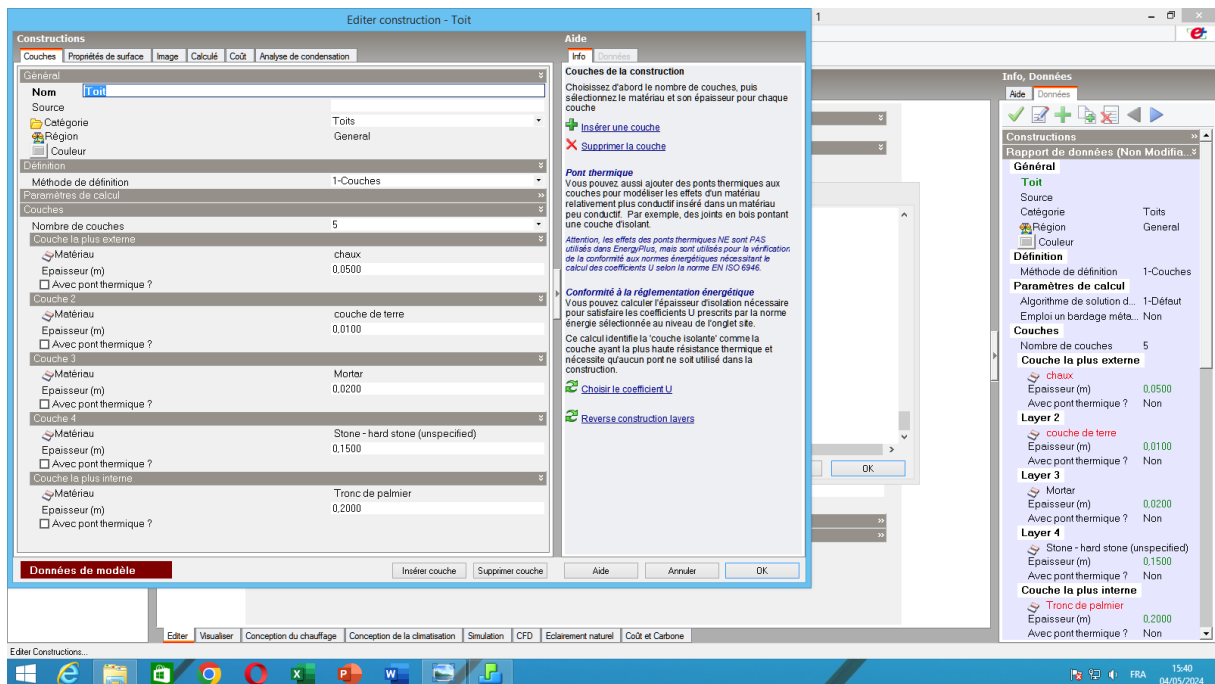


Figure 10.3: les caractéristiques de toit

2.4.4. Plancher :

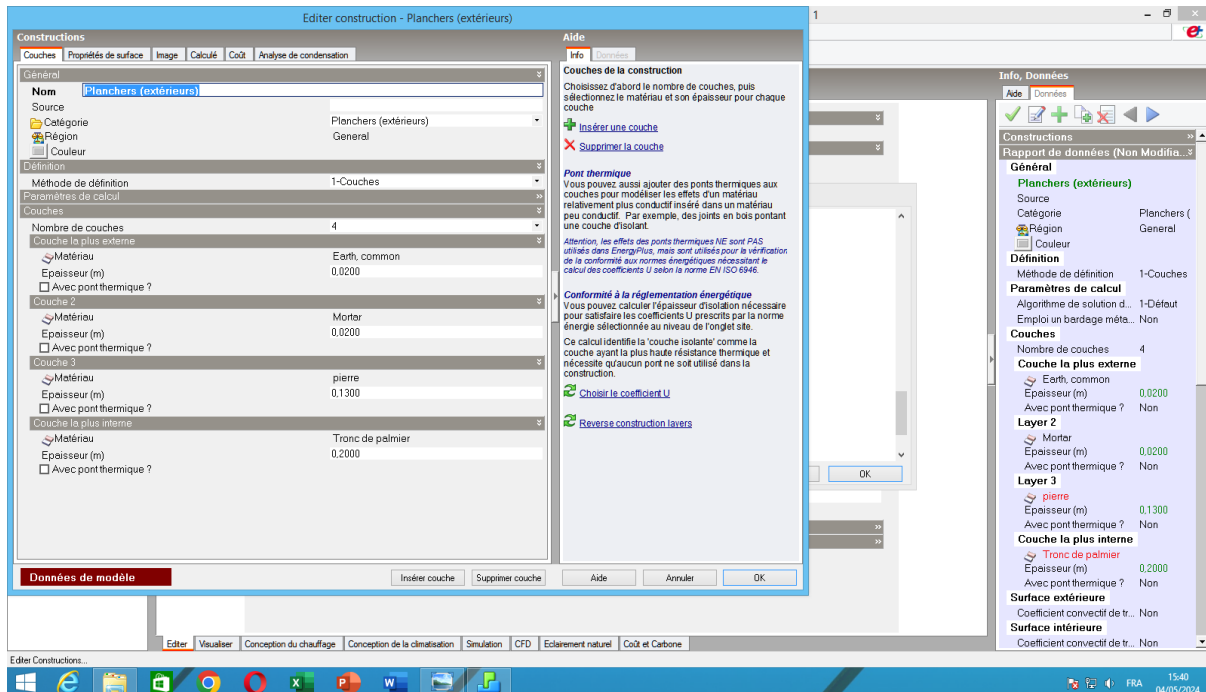


Figure 11.3: les caractéristiques de plancher

3.L'étude d'un cas réel :

3.1. Présentation et protocole de la prise de mesures :

Les mesures de température de l'air à l'intérieur et l'extérieur (en degré Celsius) ont été faites pendant l'été 2023 lors de la saison chaude (mois de juillet) et lors d'une période froide (mois de décembre). Les mesures ont été effectuées chaque deux heures dans les conditions naturelles en présence de chauffage et climatisation.

3.2. Interprétation des résultats (scénario 1) :

Les températures de l'air obtenues à l'intérieur et à l'extérieur pendant la journée de chaque mois sont représentées sous formes de graphes :

- Le mois de juillet (28/07/2023) :

Pour le cas d'été on a choisi la journée la plus chaude de l'année (28juillet) avec une température maximale de 45.10 °C et une vitesse de vent 3.7m/s et 180 degrés de direction.

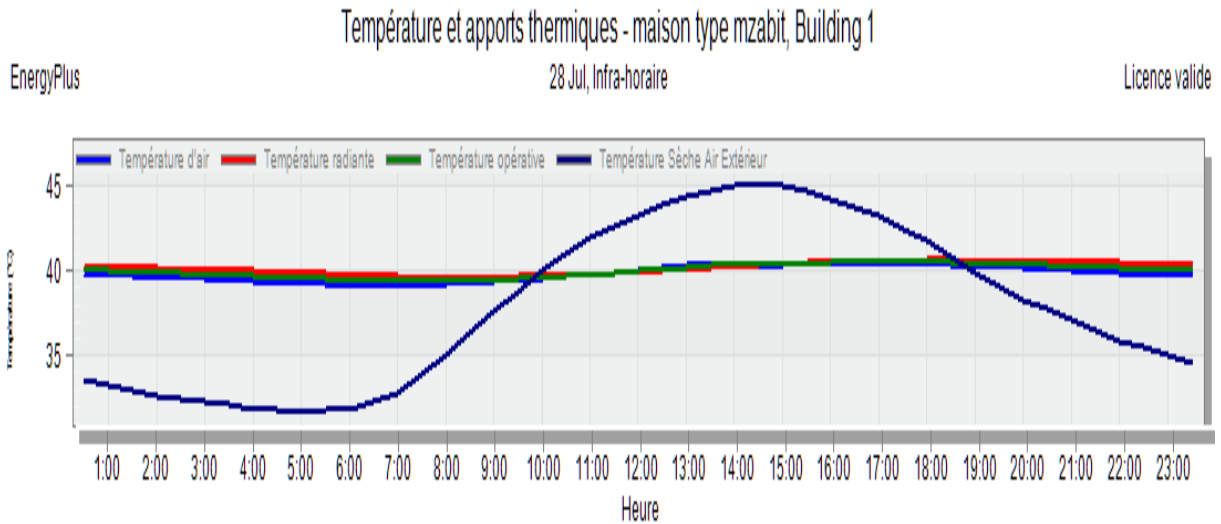


Figure 14: graphe des températures et apports thermiques du cas d'étude (28 juillet 2023)

Tableau 4:représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)

T \ H	6 :00	8 :00	10 :00	12 :00	14 :00	16 :00	18 :00	T.M
Température Int (°C)	38,69	38,74	38,97	39,56	39,98	39,81	39,67	39,34
Température sèche d'air extérieure (°C)	31,87	35,11	39,97	43,35	45,10	44,29	41,86	40,22

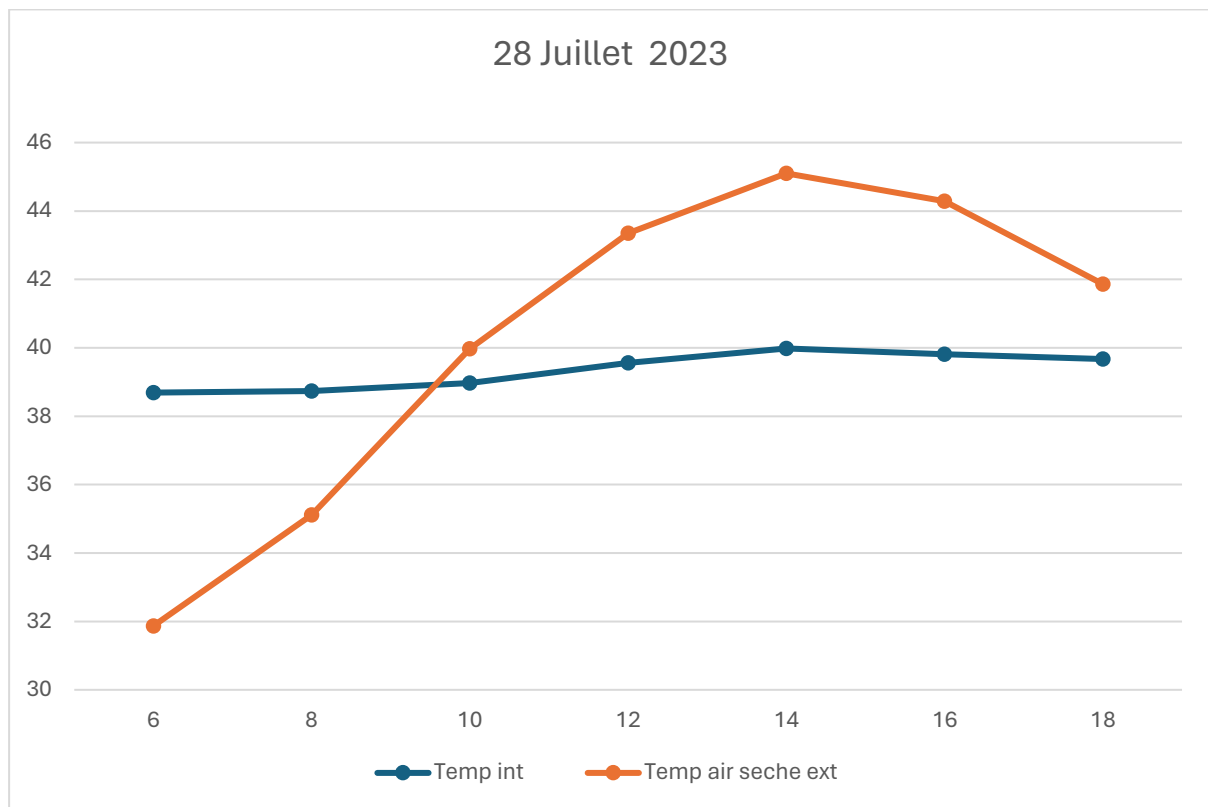


Figure 13.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)

*La température intérieure dans l'espace étudié avec une faible amplitude de 1,29 °C entre un minimum de 38,69 °C à 6h et un maximum de 39,98 °C à 14h et une température moyenne de 39,34 °C. La température extérieure présente une forte amplitude de 13,23 °C entre un minimum de 31,87 °C à 6h et un maximum de 45,10 °C à 14h et une température moyenne de 40,22 °C

* la température de l'intérieur est très élevée a cause du phénomène de déphasage thermique des parois, et dans des périodes elle baisse mais elle reste insuffisante alors on a un problème de surchauffe

Le mois de décembre (15/12/2023) :

Pour le cas d'hiver on a choisi la journée la plus froide de l'année (15 décembre) avec une température maximale 19,83 degrés Celsius et une vitesse de vent 16.5 m/s et 20 degrés de direction.

Chapitre 3 : Interprétation des résultats

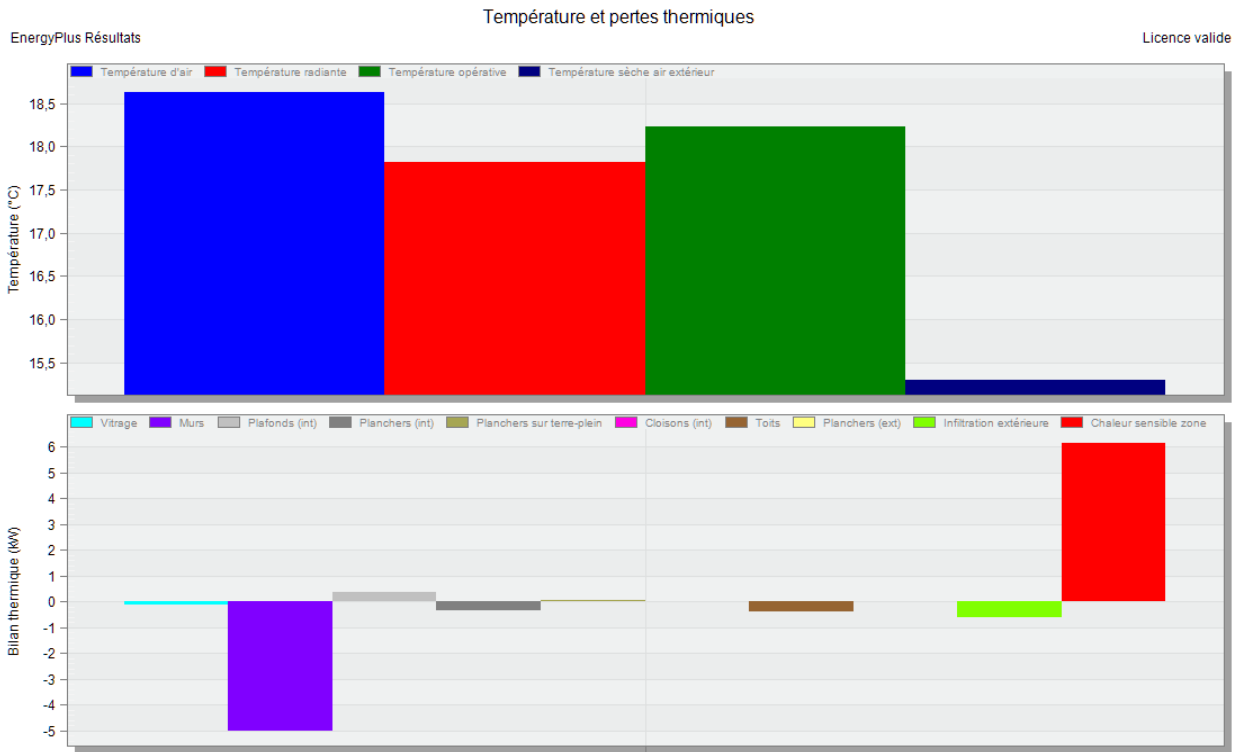


Figure 14.3: histogramme des températures et pertes thermique du cas d'étude (28 juillet 2023)

Tableau 5: représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude (15 décembre 2023)

T \ H	6 :00	8 :00	10 :00	12 :00	14 :00	16 :00	18 :00	T.M
Température int (°C)	17,81	17,57	17,72	18,02	18,33	20,38	20,34	18,59
Température d'air sèche ext (°C)	10,73	10,40	12,87	16,65	19,27	19,83	17,98	15,39

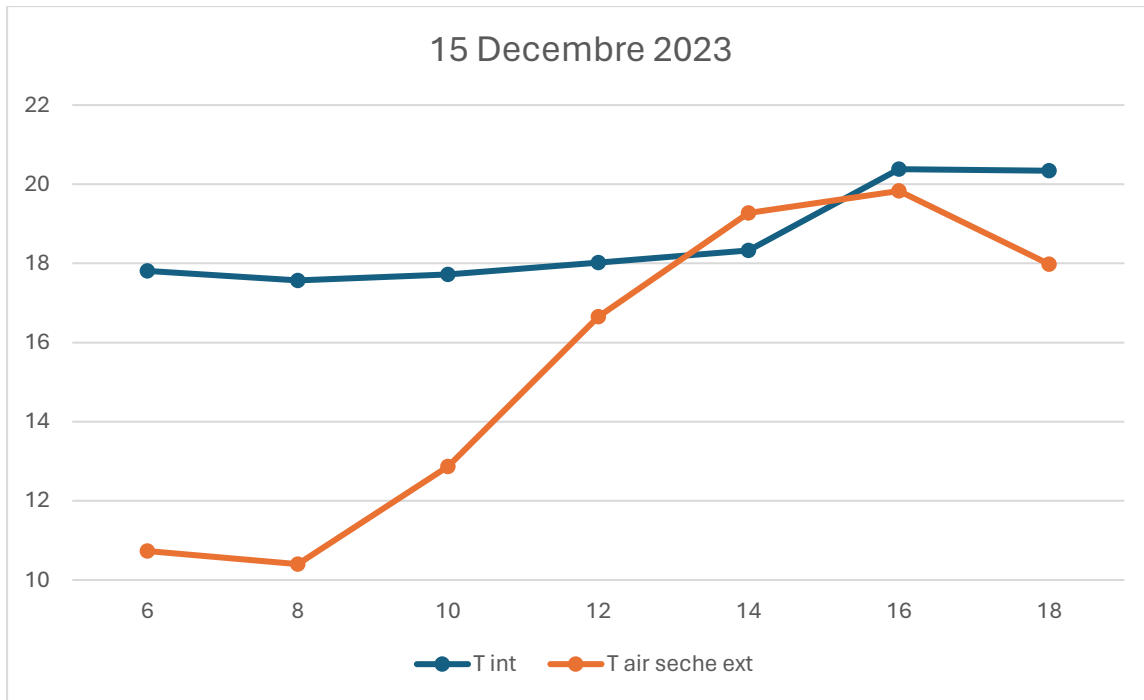


Figure 15.3: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (15 décembre 2023)

* La température intérieure dans l'espace étudié avec faible amplitude de 2,81 °C entre un minimum de 17,57 °C à 8h et un maximum de 20,38 °C à 18h et une température moyenne de 18,60°C. la température extérieure présente une forte amplitude de 9,1 °C entre un minimum de 10,73 °C à 6 h et un maximum de 19,83 °C à 16h et une température moyenne de 15,39 °C

3.3. Proposition de correction et amélioration :

La solution proposée est d'intégrer une façade ventilée en brique du côté sud de la maison d'étude pour diminuer les agressions des rayons solaires et créer un mouvement d'air entre les deux façades puis on a effectué une ventilation naturelle.

Chapitre 3 : Interprétation des résultats

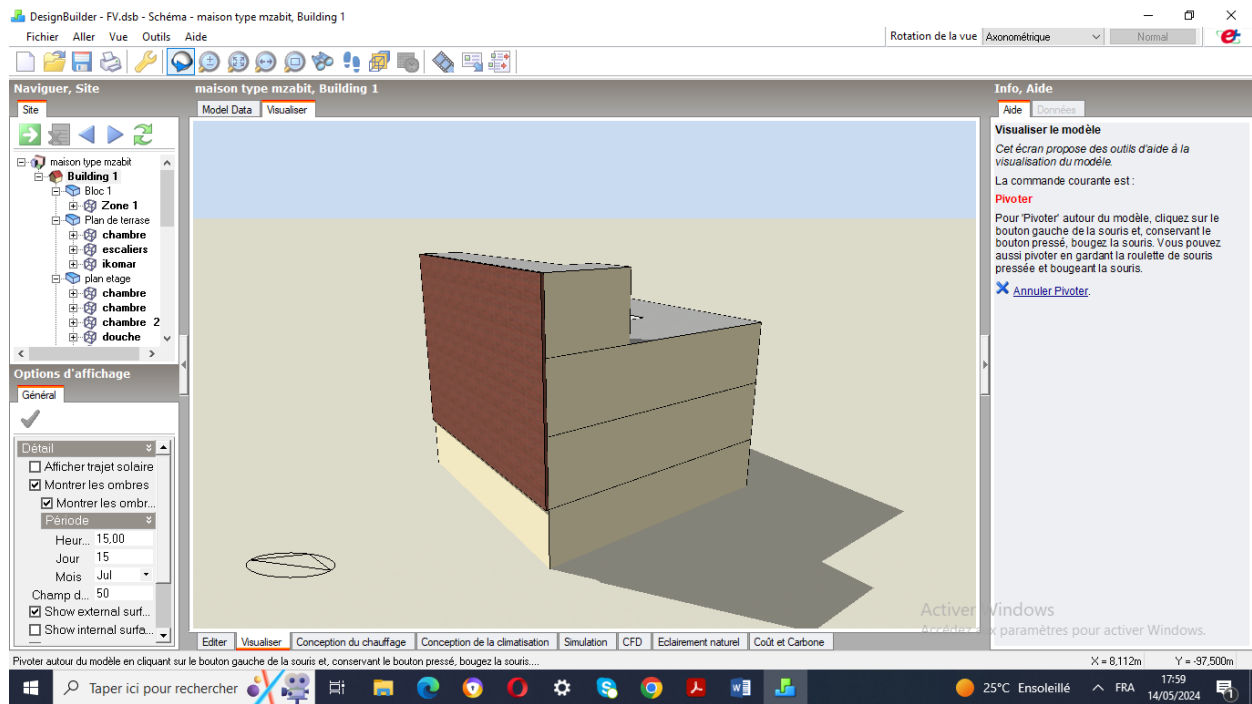


Figure 16.3: la façade ventilée du cas d'étude

3.4. Interprétation des résultats (scenario 2) :

Les températures de l'air obtenues à l'intérieur et à l'extérieur pendant la journée de chaque mois sont représentées sous formes de graphes :

- Le mois de juillet (28/07/2023) :

Pour le cas d'été on a choisi la journée la plus chaude de l'année (28 juillet) avec une température maximale de 45.10 degrés Celsius et une vitesse de vent 3.7m/s et 180 degrés de direction

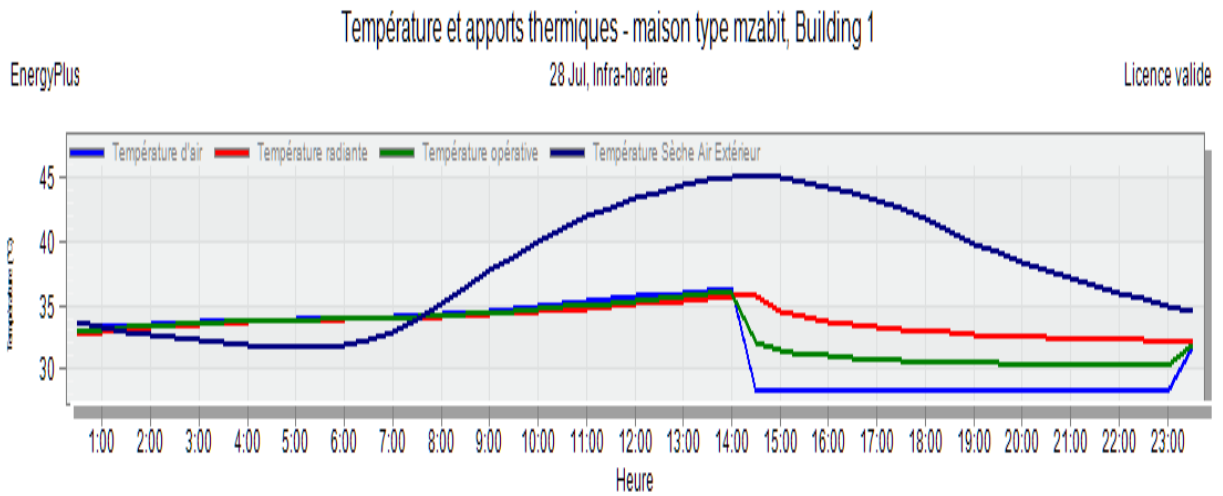


Figure 17.3: graphe des températures et apports thermique du cas d'étude (28 juillet 2023)

Tableau 6: représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)

T \ H	6 :00	8 :00	10 :00	12 :00	14 :00	16 :00	18 :00	T.M
Température int °C	35,48	35,71	36,27	36,93	37,56	31,61	31,55	35,01
Température sèche d'air extérieure °C	31,87	35,11	39,97	43,35	45,10	44,29	41,86	40,22

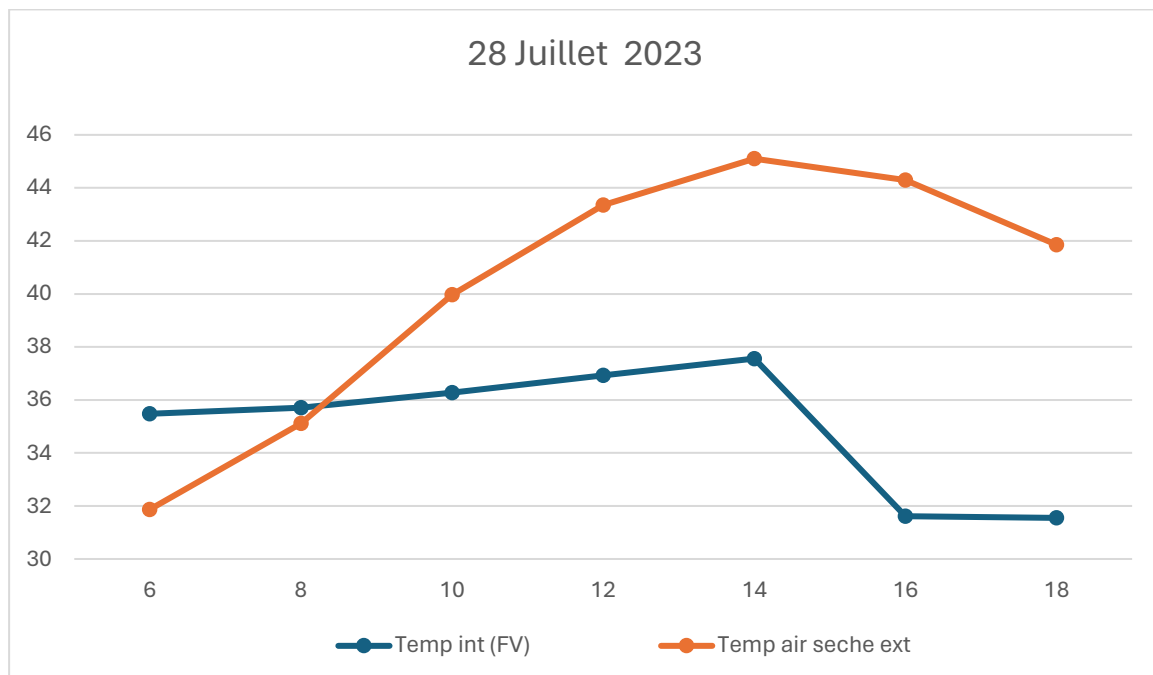


Figure 15: graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (28 juillet 2023)

*La température intérieure dans l'espace étudié avec amplitude de 6,01 °C entre un minimum de 31,55 °C à 18h et un maximum de 37,56 °C à 16h et une température moyenne de 35,01 °C. La température extérieure présente une forte amplitude de 13,23 °C entre un minimum de 31,87 °C à 6h et un maximum de 45,10 °C à 14h et une température moyenne de 40,22

- Le mois de décembre (15/12/2023) :

Pour le cas d'hiver on a choisi la journée la plus froide de l'année (15 décembre) avec une température maximale 19,83 degrés Celsius et une vitesse de vent 16.5 m/s et 20 degrés de direction.

Chapitre 3 : Interprétation des résultats

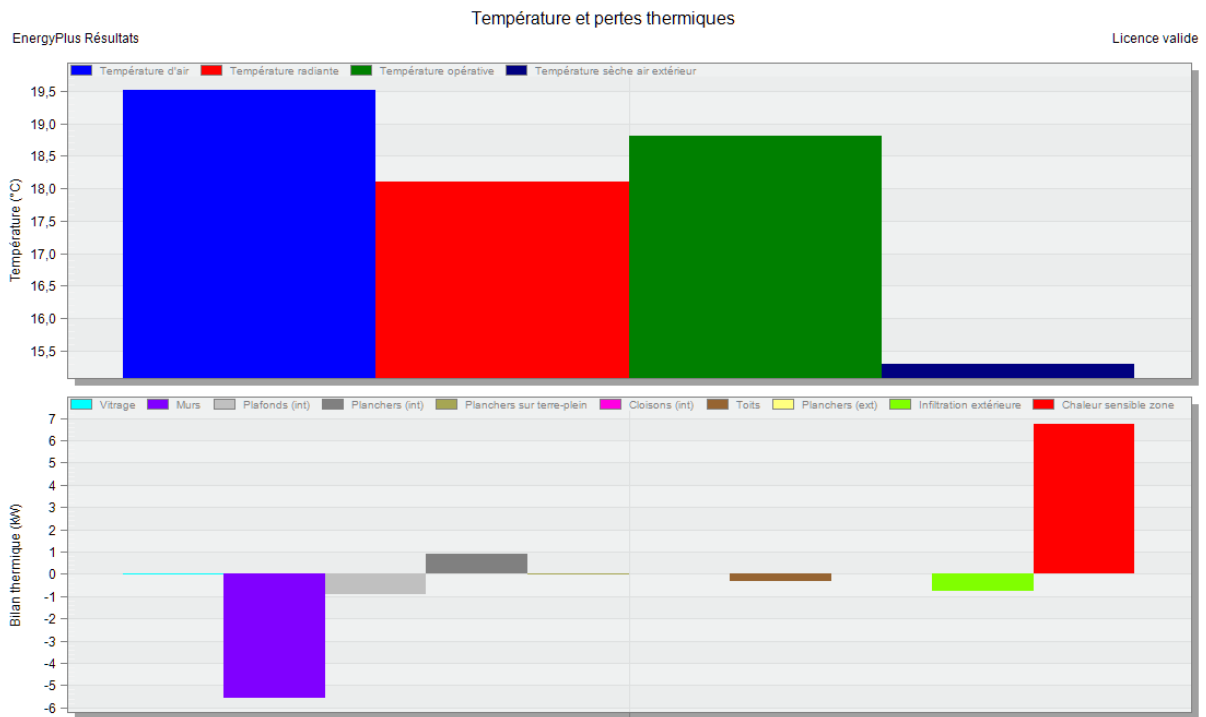


Figure 19.3 : histogramme des températures et pertes thermiques du cas d'étude
(28 juillet 2023)

Tableau 7: représente les températures intérieures et extérieures du cas d'étude
(15 décembre 2023)

T \ H	6 :00	8 :00	10 :00	12 :00	14 :00	16 :00	18 :00	T.M
Température int °C	18,53	18,28	18,57	19,10	19,58	21,22	21,09	19,48
Température d'air sèche ext °C	10,73	10,40	12,87	16,65	19,27	19,83	17,98	15,39

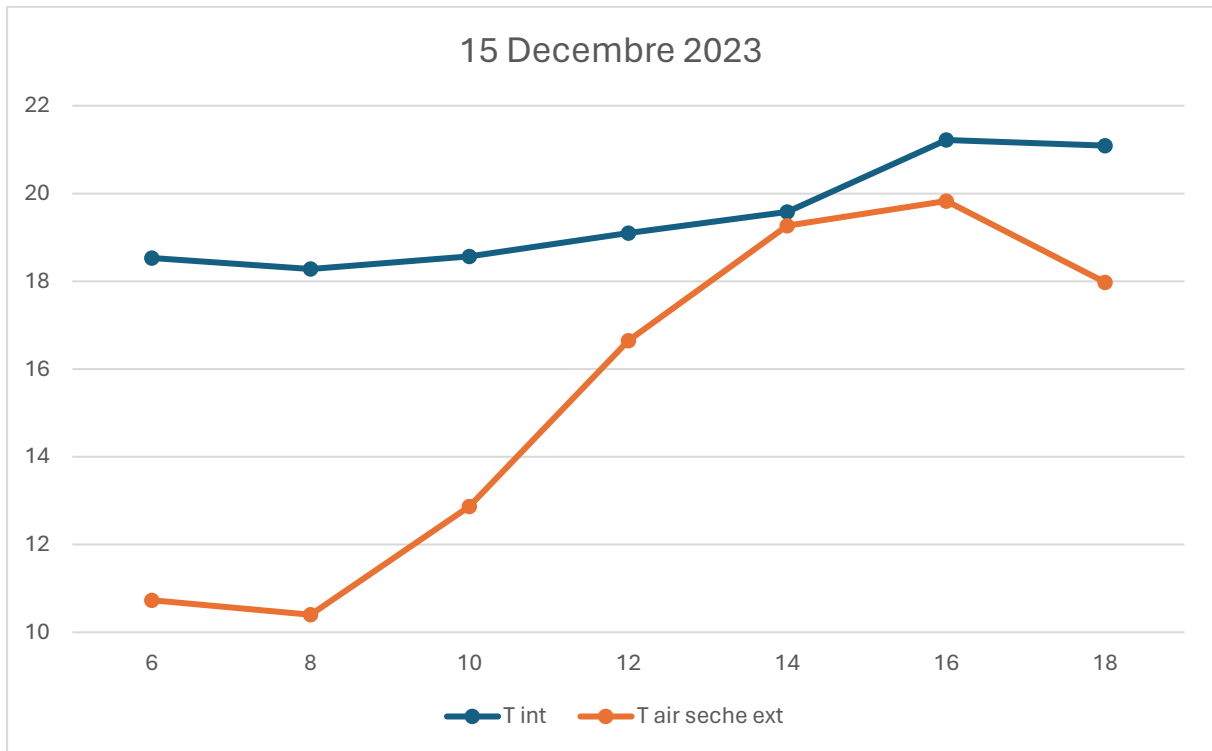


Figure 20.3 : graphe des températures intérieures et extérieures du cas d'étude (15 décembre 2023)

* La température intérieure dans l'espace étudié avec faible amplitude de 2,94 °C entre un minimum de 18,28 °C. à 8h et un maximum de 21,22 °C à 16h et la température moyenne de 19,48 °C. la température extérieure présente une forte amplitude de 9,1 °C entre un minimum de 10,73 °C à 6 h et un maximum de 19,83 °C à 16h et une température moyenne de 15,39 °C

3.5. Interprétation des résultats (comparaison des deux scenarios) :

Les températures mesurées à l'intérieur des deux cas (sans et avec façade ventilée) et la température de l'air extérieur d'une journée choisie parmi les mesures effectuées durant le mois de décembre et le mois de juillet sont présentées sous de graphes :

- Le mois de juillet (28/07/2023) :

La température moyenne intérieure dans le cas normal est 39,34 °C, après l'amélioration (Avec façade ventilée) la température moyenne intérieur est devenue 35,01 °C ou il y a un écart de 4,33 °C entre les deux cas

D'après les graphes, on remarque que dans le cas de la façade ventilée une amélioration considérable dans les températures intérieures de la maison.

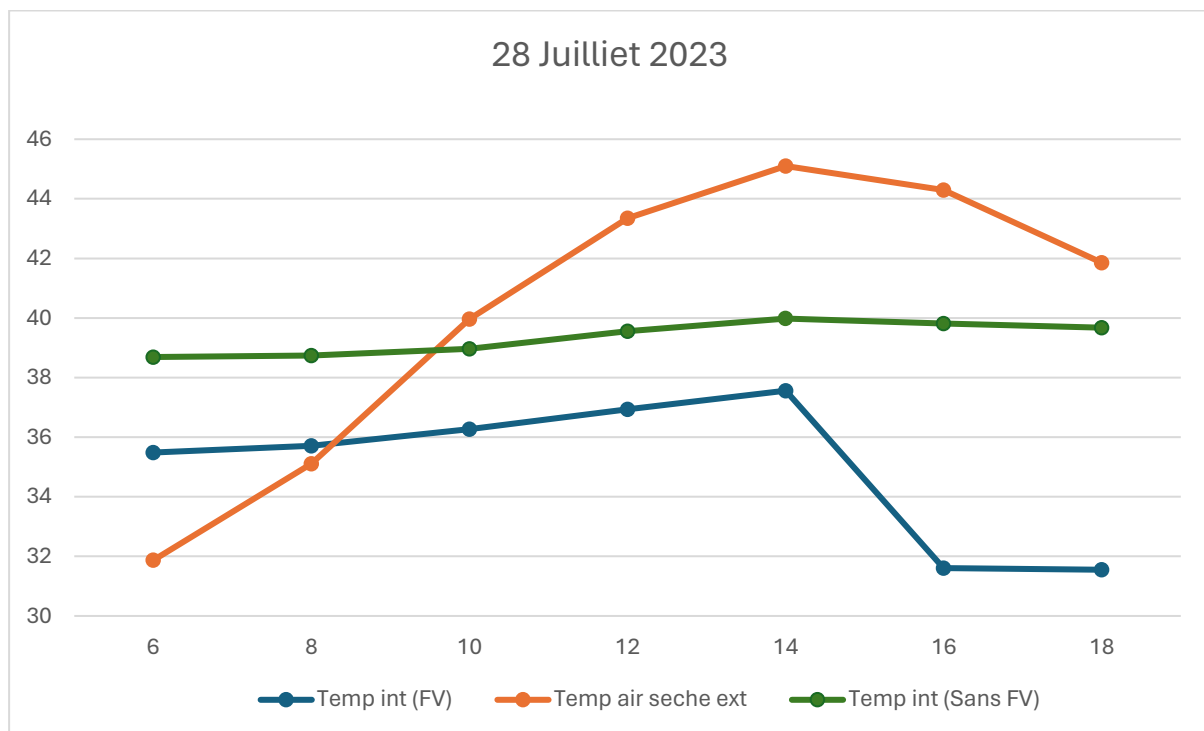


Figure 21.3: graphe des températures intérieures et extérieures (avec et sans Façade ventilée) du cas d'étude (28 juillet 2023)

- Le mois de décembre (15/12/2023) :

La température moyenne intérieure dans le cas normal est 18,59 °C, après l'amélioration (Avec façade ventilée) la température moyenne intérieur est devenue 19,48°C ou il y a un écart de 0,89°C entre les deux cas

D'après les graphes, on remarque que dans le cas de la façade ventilée une légère amélioration dans les températures intérieures de la maison

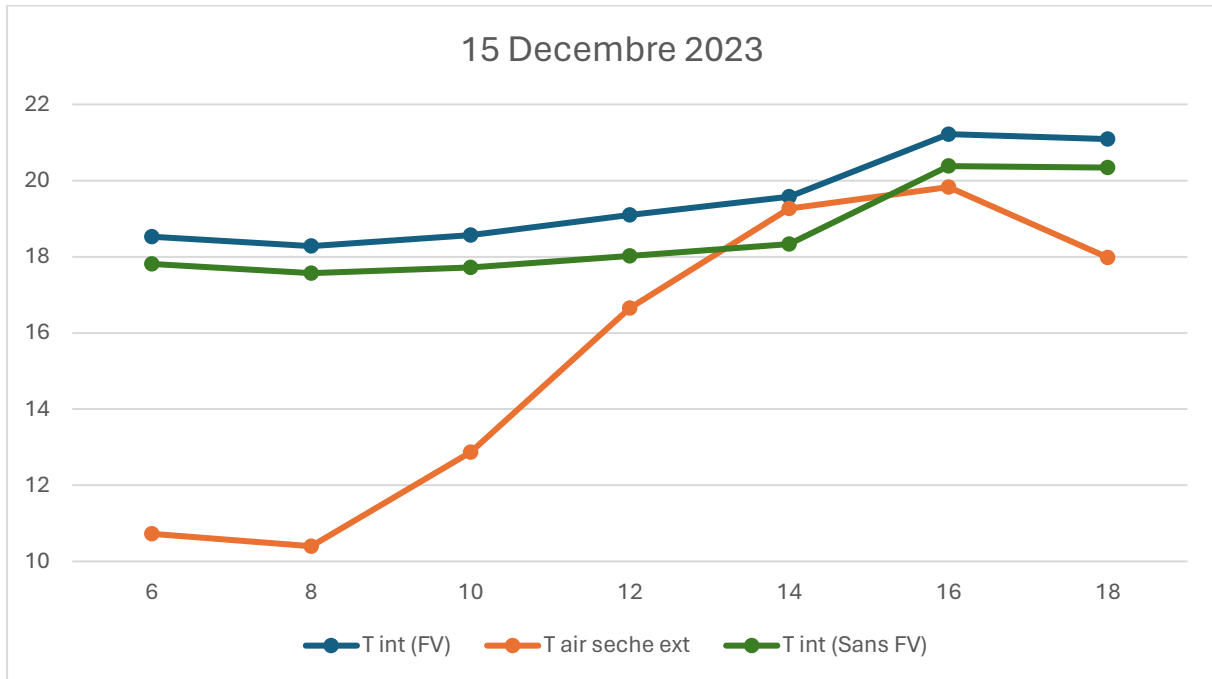


Figure 22.3: graphe des températures intérieures et extérieures (avec et sans façade ventilée) du cas d'étude (15 décembre 2023)

4. Résultats de simulation annuelle :

4.1. Confort thermique :

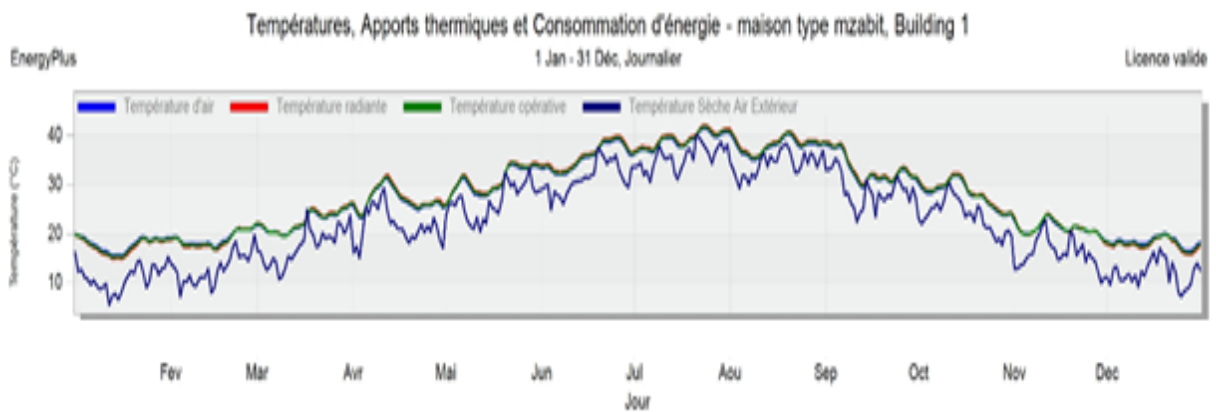


Figure 23.3: graphe annuel des températures, apports thermiques et consommation d'énergie (sans façade ventilée) du cas d'étude

Selon le graphe annuel dans le cas normal, la température de l'air intérieur est très élevée dans la saison estivale, on constate que l'habitation est dans une situation d'inconfort.

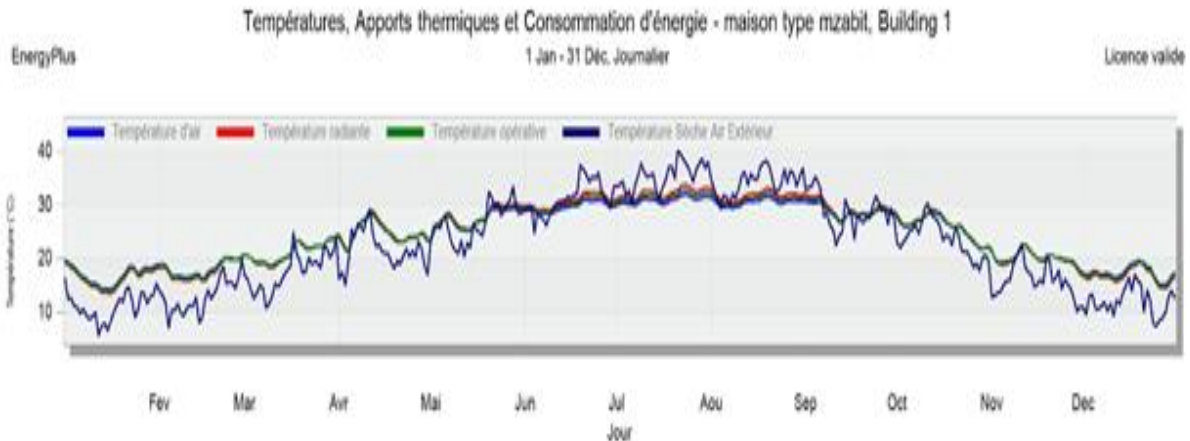


Figure 24.3 : graphe annuel des températures, apports thermiques et consommation d'énergie (avec façade ventilée) du cas d'étude

Selon le graphe annuel dans le cas amélioré (avec façade ventilée), la température de l'air intérieur a diminué dans la saison estivale par rapport au premier cas, ou on peut dire que le confort dans la maison a augmenté.

Interprétation des résultats :

Au vu de ces résultats, on peut considérer que la façade ventilée agit comme un amortisseur thermique, comme il s'avère Très bénéfique lorsque la température extérieure est élevée. Cela est dû à l'effet du revêtement (Utilisé pour protéger les murs du rayonnement solaire direct) et l'énorme impact des cavités d'air (réduire le transfert de chaleur par conduction) grâce à leur capacité de stockage de chaleur, les murs peuvent atténuer les pics de chaleur.

Pour terminer cet essai, on peut considérer que la façade ventilée en brique (sans isolation) apporte un bon potentiel pour améliorer les conditions de confort thermique à

Ghardaïa, surtout pendant les températures élevées Canicules (dans le contexte et les limites de l'étude).

Les effets de l'été sont plus intéressants que ceux de l'hiver, nous On peut dire que ce dispositif aurait été efficace à Ghardaïa sans les défauts causés par le manque d'isolateurs

4.2. Consommation énergétique :

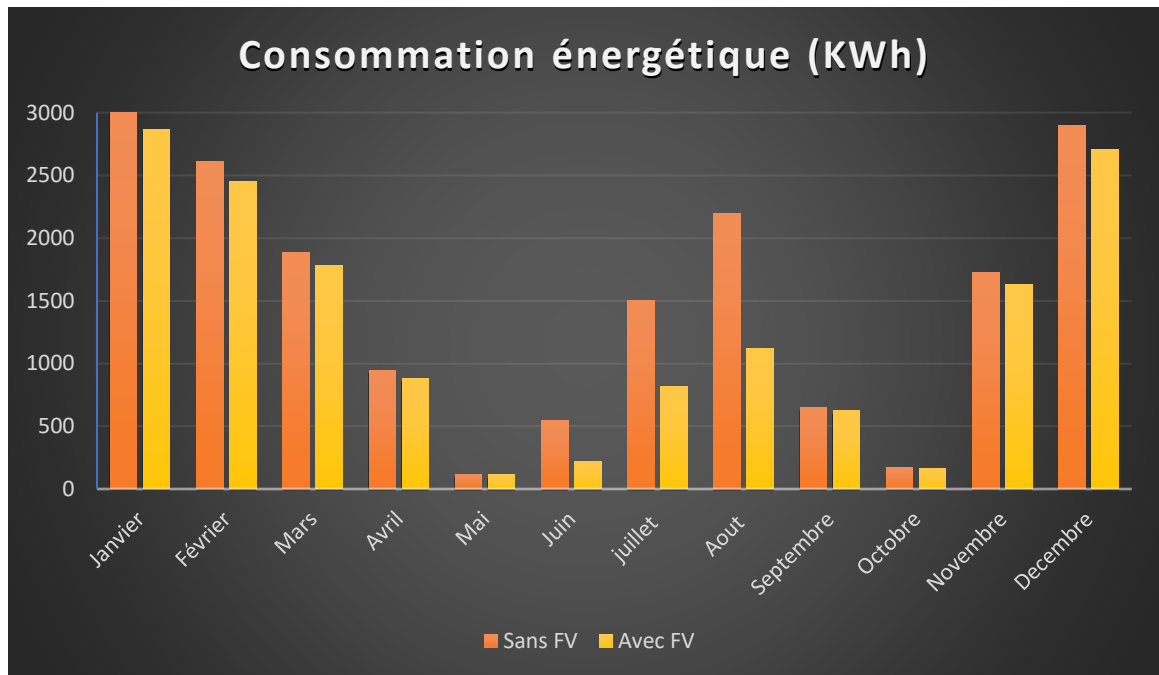


Figure 25.3 : histogramme des besoins énergétiques annuels (chauffage et climatisation) simulés

La lecture des résultats concernant les besoins énergétiques annuels simulés de chauffage et climatisation montre que l'énergie consommée dans le cas sans façades est plus élevée par rapport au cas qui dispose la façade ventilée en brique.

On constate que pour le premier cas la consommation énergétique annuelle enregistrée est 18370,83kwh

Pour la façade ventilée en brique a permis de réduire la consommation énergétique de 16,26 % est devenue 15382,13 kWh

Le graphe de comparaison des besoins énergétiques annuels de chauffage et climatisation montre que la façade ventilée à un impact positif sur la minimisation de la consommation énergétique

Conclusion :

La façade ventilée est considérée comme une isolation extérieure pour un bâtiment. Elle s'inscrit dans l'optique thématique des bâtiments à haute performance énergétique et de confort thermique

L'étude numérique élaborée sur la façade ventilée en brique a donné une bonne compréhension relative à leur impact sur la performance énergétique d'une maison individuelle sous les conditions d'un climat aride.

Les résultats obtenus de cette simulation, montrent que l'intégration de la façade ventilée contribue considérablement à l'amélioration et la préservation des conditions de confort thermique tout en minimisant les besoins énergétiques des bâtiments résidentiels

Conclusion générale

L'enveloppe du bâtiment est un véritable échangeur thermique qu'il est possible d'adapter aux environnements intérieur et extérieur. Le comportement des éléments qui le composent influent sur l'efficacité énergétique du bâtiment.

La façade joue un rôle crucial dans cette enveloppe. D'un point de vue thermique et énergétique, la performance de la façade relève de facteurs multiples à la fois conceptuels, matériels et techniques.


La recherche réalisée porte sur les maisons traditionnelles et plus précisément sur l'habitat situé dans un contexte climatique aride. La ville de Ghardaïa a été choisie comme cas d'étude (Ksar Beni Isguen).

La façade ventilée en brique est considérée comme un dispositif intelligent qui s'adapte aux différentes conditions climatiques, peut réduire la consommation énergétique et améliorer le confort thermique dans l'habitat sont les hypothèses émises dans cette recherche afin de répondre à la problématique.

La recherche constitue une contribution dont l'objectif est de développer nos connaissances sur les enveloppes intelligentes et évaluer l'effet de cette dernière sur la consommation énergétique dans l'habitat situé dans les zones arides (Ghardaïa) ainsi que l'établissement des recommandations sur l'adaptation de la façade ventilée à la maison pour maîtriser et optimiser la performance énergétique.

Afin d'atteindre nos objectifs de recherche et d'acquérir une meilleure compréhension de notre sujet, notre recherche est divisée en deux parties principales, la première partie, Étude théorique consiste en une exploration de la documentation sur le sujet proposé (Livres, articles, etc...). Visite sur site, relevé et la seconde partie, l'expérimentation, Sur le cas d'étude (Ksar de Beni isguen) pour la vérification des hypothèses de départ par l'usage de l'outil de simulation à l'aide d'un logiciel (design Builder).


Cette simulation a été effectuée sur une maison (R+1) avec deux scénarios proposés (façade conventionnelle, intégration de la façade ventilée côté sud de la maison) au mois de juillet pour la climatisation et au mois de décembre pour le chauffage. La lecture des résultats concernant les besoins énergétiques montre que l'énergie consommée dans le cas normale est plus élevée par rapport au cas de la façade ventilée en brique durant l'année de l'étude et que la façade améliorée a permis de minimiser la consommation énergétique surtout dans la période d'été ainsi qu'elle a qualifié les conditions de confort thermique à Ghardaïa, surtout pendant les températures élevées Canicules (dans le contexte et les limites de l'étude). Les effets de l'été sont plus intéressants que ceux de l'hiver, nous On peut dire que ce dispositif aurait été efficace à Ghardaïa sans les défauts causés par le manque d'isolateurs.



A partir de ces résultats on peut répondre au problématique que l'intérêt d'intégrer des façades ventilées dans une maison individuelle algérienne située dans un environnement méditerranéen est d'améliorer et préserver les conditions de confort thermique tout en réduisant les besoins énergétiques, il suffit de faire un bon choix de la façade ventilée selon le cas

Références

- [1] M.A.Khadraoui et L.Sriti, Etude expérimentale du comportement thermique d'une façade ventilé dans un climat chaud et aride , Decembre 2017
- [2] CURT, Collaboration, Integrated Information and the Project Life Cycle in Building Design, Construction and Operation, Construction Users Roundtable - CURT, Cincinnati, USA, 2004.
- [3] Tempio, Façades ventilées Tempio, [En ligne], http://www.tempio.es/fr/facades_ventilées.
- [4] R.S. Athauda, A.S. Asmone, S. Conejos, Climate change impacts on facade building materials: a qualitative study, Sustainability 15 (10) (2023) 7893, <https://doi.org/10.3390/su15107893>.
- [5] Ariostea, Façades ventilées. [En ligne], http://www.ariostea.fr/technique/facades_ventilees,
- [6] L.W. Chew, X.-X. Li, M.Y.L. Chew, Climate change projection and its impacts on building façades in Singapore, Sustainability 15 (4) (2023) 3156, <https://doi.org/10.3390/su15043156>.
- [7] BBRI, Ventilated Double Skin Façades Classification & Illustration of Façade Concepts International Energy Agency, Brussels (2005)
- [8] F.D. Ching Building Construction Illustrated. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey (2014)
- [9] Z. Su, X. Li, F. Xue Double-skin façade optimization design for different climate zones in China .Sol. Energy, 155 (2017), pp. 281-290
- [10] A. Gelesz, et al. Characteristics that matter in a climate façade: a sensitivity analysis with building energy simulation tools. Energy and Buildings, 229 (2020), Article 110467
- [11] L. Xu, T. Ojima. Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin façade system. Build. Environ., 42 (2007), pp. 2014-2023
- [12] S.A. Anđelković, B. Gvozdenac-Urošević, M. Kljajić, G.M. Ignjatović
Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. Energy Build., 86 (2015), pp. 766-781
- [13] Deoux, S, P. Deoux (2004), Le guide de l'habitat sain : habitat, qualité, santé pour bâtir une santé durable, 2 éd. rev. et augm. Andorre: Medieco, p.137.
- [14] V. Gavan, M. Woloszyn, F. Kuznik, J.-J. Roux. Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with Venetian sun-shading device: a full-scale investigation in controlled environment. Sol. Energy, 84 (2) (2010), pp. 183-195

-
- 
- [15] J. Peng, et al. Developing a Methods and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin façade. *Progress in Photovoltaics*, 24 (6) (2016)
- [16] E. Sanchez, A. Rolando, R. Sant, L. Ayuso. Influence of natural ventilation due to buoyancy and heat transfer in the energy efficiency of double skin façade building. *Energy for Sustainable Development*, 33 (2016), pp. 139-148
- [17] Z. Ioannidis, A. Buonomano, A. Athienitis, T. Stathopoulos. Modeling of double skin façades integrating photovoltaic panels and automated roller shades: analysis of the thermal and electrical performance. *Energy Build.*, 154 (2017), pp. 618-632
- [18] Z.S. Zomorodian, M. Tahsildoost. Energy and carbon analysis of double skin façades in the hot and dry climate. *J. Clean. Prod.*, 197 (1) (2018)
- [19] D.D. Kim. Computational fluid dynamics assessment for the thermal performance of double-skin façades in office buildings under hot climatic condition CIBSE Building Services Engineering Research and Technology, 42 (1) (2020)
- [20] T. Saroglou, T. Theodosiou, b. Givoni, A.I. Meir. Studies on the optimum double-skin curtain wall design for high-rise buildings in the Mediterranean climate. *Energy Build.*, 208 (2020), Article 109641
- [21] G. Ballestini , M. De Carli , N. Masiero , G. Tombola. Possibilités et limites de la ventilation naturelle dans les bâtiments d'archéologie industrielle restaurés à façade double peau dans les climats méditerranéens. *Construire. Environ.* , 40 (7) (2005) , pages 983 à 995
- [22] T. Inan, T. Basaran. Experimental and numerical investigation of forced convection in a double skin façade by using nodal network approach for Istanbul *Sol. Energy*, 183 (2019), pp. 441-452
- [23] A. Alberto, N.M. Ramos, R.M. Almeida. Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries. *J. Build. Eng.*, 12 (2017), pp. 87-98
- [39] The contribution of double skin roof coupled with thermo reflective paint to improve thermal and energy performance for the ‘Mozabit’ houses: Case of Beni Isguen’s Ksar in southern Algeria” .Meryem Kadri a, Ammar Bouchair b, Abdelkader Laafer c.
- [40] Some solar passive concepts in habitat through natural ventilation case study: Dry climate in Algeria Ghardaia
- [41] <https://fr.weatherspark.com/y/147956/Météo-moyenne-à-Ghardaïa-Algérie-tout-au-long-de-l'année>
- [42] Boubekri Ikram et Smail Meriem. Impact des façades cinétiques sur le confort thermique des équipements de loisir à Alger
- [43] Y. Bonête, « Beni Isguen », Encyclopédie berbère [Online \[archive\]](#), document B60, Online since 01 March 2013, connection on 18 January 2020
- [44] <https://designbuilder.co.uk>

[45] <https://www.batisim.net/designbuilder.html>

[46] l'impact de la façade ventilée sur le confort thermique pour une efficacité énergétique, Benrabah Bassema

[47] <https://www.equitone.com/fr-fr/blog/333636/facade-ventilee/>

[48] <https://fr.scribd.com/document/470925521/Facade-ventilee>

[49] La performance thermique de la façade ventilée dans les infrastructures de transport : Cas Aéroport Ferhat Abbas Achouat Jijel.

Khaleff, Ahlam; Khalil, Lemya; Hamriche, Salima; Bouketta, Samira (Encadreur)

[50] <https://prescriptor.info/fiches/42/facade-ventilee>

[51] A Critical Review of the Use of Double-Façades for Office Buildings in Cool Humid Climates John Straube

[52] <https://www.equitone.com/fr-fr/blog/333636/facade-ventilee/>

[53] ask.hilti.fr/article/fixation-dune-facade-ventilee-sur-un-materiau-de-faible-resistance/5y7nib

[54]: The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integrat

[55] : <https://www.guardianglass.com/eu/fr/insights/double-skin-facades--selecting-the-right-combination-of-glass-to>

[56]: <https://rautagroup.com/en/ventilated-facade-ideas-for-modern-buildings-creation/>

[57]: <https://architectureecologique.fr/dispositifs-dombrage-pour-le-controle-solaire/>

[58]: The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and build

[59]: www.opvm.dz

[60] : <https://fr.weatherspark.com/y/147956/Météo-moyenne-à-Ghardaïa-Algérie-tout-au-long-de-l-année>

[61] Google maps modifié par l'auteur











