

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université A. MIRA - Bejaia

Faculté de Technologie  
Département de génie civil  
Filière : Génie Civil  
Option : Structures



## *Mémoire de fin d'étude*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

*Option* : Structures

### *Thème*

**Évaluation du potentiel des stratégies passives de chauffage  
et de rafraîchissement en Algérie : comparaison entre les  
méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique.**

*Présenté par*

CHAFA Amira

FEREDJ Dihia

Soutenu le : 30/06/ 2024

Devant le jury composé de :

Mr. A. TAHAKOURT ----- Président

Mme H. CHIKH AMER ----- Rapporteur

Mr. N. OUDNI ----- Examineur

**2023 / 2024**

## **Remerciements**

*Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu tout-puissant pour nous avoir donné la force, le courage, la détermination et la foi nécessaires à la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude à notre directrice de mémoire, Dr. Chikh Amer Habiba, pour sa patience, ses précieux conseils et sa disponibilité constante. Son soutien de tous les instants a été inestimable, et nous lui adressons nos sincères remerciements.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie, et plus particulièrement ceux du département de génie civil de l'université de Bejaïa Abderrahmane Mira.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur soutien et leur aide indispensable à la réalisation de ce travail.*

**CHAF A Amira & FEREDJ Dihia**

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à,

Mon père, mon héros et mon modèle. Grâce à toi, j'ai appris la valeur du travail acharné, de la persévérance et de l'honnêteté.

Ma mère, ma force et mon inspiration. Celle qui m'a montré ce qu'est vraiment l'amour inconditionnel et ce que cela signifie d'être fort, compatissant et gentil.

Je suis fière d'avoir des parents comme vous et je vous remercie pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À ma sœur, complice et amie de toujours, merci pour ta présence réconfortante, ta gentillesse et tes encouragements constants et aussi ton soutien inlassable.

Merci d'être une source constante de joie et de motivation.

Je dédie également ce travail,

À tous les membres de la famille FEREDJ, ainsi qu'à mes grands-parents, pour leur soutien et leurs encouragements constants, de près comme de loin.

A ma binôme et amie *Amira*, Merci, ta compréhension et ton aide ont été inestimables.

*And of course :*



**DIHIA**

## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à,

Ma famille, les membres de la famille "*CHAF*A", en particulier mes parents, qui ont toujours été un soutien indéfectible tout au long de mes études. Leur soutien inconditionnel a été le pilier sur lequel j'ai pu m'appuyer. Je leur exprime ma plus profonde gratitude et reconnaissance.

A celle qui m'a arrosée de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible qui ma bénie par ses prières ma maman *CHAF*A *Zohra*.

A mon support dans ma vie, qui m'a encouragé et ma dirigé vers la gloire mon père *CHAF*A *Omar*.

Je dédie également ce travail,

A mes chères *sœurs Lynda, Selma, Dalila, Katia, Kamelia et Racha*, qui ont été des compagnes de route et des sources de joie et de soutien tout au long de mon parcours.

A mes meilleures amies *Celia et Dyhia*, dont le soutien moral a été d'une importance capitale pour moi. Leurs encouragements et leur présence ont rendu cette expérience moins solitaire et plus enrichissante.

Sans oublier ma binôme *DIHIA* à qui je dis merci pour sa compréhension tout au long de la réalisation de ce travail.

*And of course :*



***AMIRA***

## Résumé

La consommation d'énergie et le confort thermique dans les bâtiments sont fortement influencés par les conditions climatiques. Dans ce travail, on évalue le potentiel de quelques stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie, en comparant deux outils d'analyse : la méthode psychrométrique et la modélisation dynamique.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le logiciel Climate Consultant pour réaliser une analyse bioclimatique des différentes zones climatiques en Algérie. Cette analyse a permis d'identifier les stratégies passives les plus efficaces pour chaque zone, en fonction des données climatiques locales. Le potentiel de ces stratégies pour améliorer le confort thermique des occupants tout en réduisant la consommation énergétique a été évalué.

Dans un second temps, nous avons modélisé et simulé le comportement thermique d'un local en utilisant le logiciel TRNSYS. Ces simulations ont permis de comparer les résultats de l'analyse psychrométrique avec ceux obtenus par la modélisation numérique. L'objectif de cette comparaison est d'évaluer la pertinence des outils graphiques dans les différents climats. Les résultats permettent aux architectes et aux urbanistes de mieux comprendre le climat et de fournir des conseils pratiques en matière de conception.

La combinaison des analyses bioclimatiques et des simulations dynamiques constitue une approche stratégique pour relever les défis climatiques et énergétiques actuels en Algérie. Cette approche contribue de manière significative à la transition vers des bâtiments plus durables et à faible empreinte carbone.

**Mots clés :** TRNsys, Climate Consultant, confort thermique, stratégies passives.

### Abstract

**T**he energy consumption and thermal comfort in buildings are heavily affected by weather conditions.

In this work, we evaluate the potential of some passive heating and cooling strategies in Algeria, by comparing two analysis tools: the psychrometric method and dynamic modelling.

Firstly, we used Climate Consultant software to carry out a bioclimatic analysis of the different climatic zones in Algeria. This analysis enabled us to identify the most effective passive strategies for each zone, based on local climate data. The potential of these strategies to improve thermal comfort for occupants while reducing energy consumption was assessed.

Secondly, we modelled and simulated the thermal behaviour of a single room using TRNSYS software. These simulations were used to compare the results of the psychrometric chart-based analysis with those obtained from the numerical modelling. The aim of this comparison is to assess the relevance of the graphical tools in different climates. The results provide architects and builders with a better understanding of the climate and practical design advice.

The combination of bioclimatic analyses and dynamic simulations is a strategic approach to meeting Algeria's current climate and energy challenges. This approach makes a significant contribution to the transition towards more sustainable, low-carbon buildings.

**Keywords** : TRNsys, Climate Consultant, thermal comfort, passive strategies

## Table des matières

Résumé .....	iv
Abstract.....	v
Table des matières.....	vi
Table des figures .....	ix
Liste des tableaux .....	xi
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I Les stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les stratégies en relation avec le bâtiment.....	4
I.2.1 L'enveloppe du bâtiment.....	4
I.2.2 Orientation du bâtiment.....	6
I.2.3 Ajouts des fontaines.....	9
I.2.4 Matériaux de construction.....	10
I.2.5 Isolation thermique.....	13
I.3 Les techniques intégrées au bâtiment.....	15
I.3.1 Ventilation naturelle .....	15
I.3.2 Protections solaires et ombrages.....	16
I.3.3 Végétalisation des parois du bâtiment.....	19
I.3.4 Cool-roof.....	22
I.3.5 Bassin d'eau .....	23
I.3.6 Les puits canadiens.....	24
I.3.7 Les murs trombe.....	25
I.3.8 Plancher solaire direct .....	27
I.4 Conclusion .....	28
<b>Chapitre II Confort thermique .....</b>	<b>33</b>
II.1 Introduction.....	34
II.2 Notion de confort thermique dans le bâtiment.....	34
II.3 Les paramètres influençant le confort thermique .....	34
II.4 Les critères nécessaires pour éviter l'inconfort dans un local.....	35
II.5 Mécanismes d'échanges thermiques.....	36
II.5.1 Conduction.....	36

II.5.2	Convection.....	36
II.5.3	Rayonnement .....	36
II.5.4	Évaporation ou condensation.....	36
II.6	Evaluation du confort thermique .....	37
II.6.1	Evaluation par les indices thermiques .....	37
II.6.2	Les modèles environnementaux simples.....	40
II.6.3	Evaluation par les outils graphiques .....	40
II.7	Les modèles approfondis.....	41
II.7.1	La simulation thermique dynamique (STD).....	42
II.8	Les normes et réglementations du confort thermique.....	43
II.8.1	La norme ISO .....	43
II.8.2	Les normes d'ASHRAE .....	43
II.8.3	Les normes et réglementations en Algérie .....	45
II.9	La situation énergétique en Algérie .....	45
II.9.1	La consommation énergétique par type d'énergie.....	46
II.9.2	Consommation énergétique par secteur d'activité.....	46
II.10	Principaux consommateurs d'énergies : les bâtiments .....	47
II.11	Conclusion .....	47
<b>Chapitre III</b>	<b>Analyse bioclimatique .....</b>	<b>51</b>
III.1	Introduction.....	52
III.2	Présentation du logiciel : Climate consultant .....	52
III.3	Principe de l'Analyse Bioclimatique avec Climate Consultant .....	53
III.4	Le climat en Algérie.....	54
III.5	Les différentes stratégies passives considérées dans l'étude .....	56
III.6	Résultats et discussions.....	57
III.6.1	Analyse Psychrométrique des différentes Villes représentatives .....	57
III.6.2	Potentiel de confort de chaque stratégie .....	64
III.6.2.1.	Ventilation Naturelle .....	64
III.6.2.2.	Effet de la protection solaire des fenêtres et des ombrages .....	65
III.6.2.3.	Effet de l'inertie thermique .....	66
III.6.2.4.	Effet de chauffage solaire passif.....	67
III.7	Conclusion .....	68

<b>Chapitre IV Simulation numérique du confort thermique .....</b>	<b>71</b>
IV.1 Introduction.....	72
IV.2 Description de la construction simulée .....	72
IV.2.1 Constitution et caractéristiques des parois.....	72
IV.2.2 Conditions d'occupation .....	73
IV.3 Présentation de logiciel TRNSYS.....	73
IV.3.1 La démarche de simulation sous TRNSYS .....	74
IV.4 L'interface TRN BUILD .....	75
IV.4.1 Les étapes de réalisation du bâtiment .....	75
IV.5 Simulation studio.....	79
IV.5.1 Types .....	80
IV.6 Avantages et inconvénients de TRNSYS.....	82
IV.7 Simulations réalisées .....	82
IV.8 Résultats .....	83
IV.8.1 Local en évolution libre .....	83
IV.8.2 Effet de la ventilation naturelle .....	83
IV.8.3 Effet de la protection solaire des fenêtres .....	85
IV.8.4 Effet de l'inertie thermique .....	86
IV.8.5 L'effet de chauffage solaire passif.....	87
IV.9 Comparaison entre les résultats des deux approches : Analyse psychrométrique et modélisation numérique .....	89
IV.9.1 Local en évolution libre .....	89
IV.9.2 Potentiel de la ventilation naturelle.....	90
IV.9.3 Protection solaire des fenêtres .....	90
IV.9.4 Inertie thermique .....	91
IV.9.5 Chauffage solaire passif.....	92
IV.9.6 Comparaison entre les temps de confort annuel .....	92
IV.10 Conclusion.....	93
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>96</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>98</b>

## Table des figures

<b>Figure I.1.</b> Impact de la forme, la taille et la proximité d'autres volumes sur la compacité de formes simples [2] .....	4
<b>Figure I.2.</b> L'influence du rapport de la surface de l'enveloppe (A) sur le volume d'une chambre (V) sur l'énergie primaire dans une chambre selon des différentes qualités de l'isolation [3] .....	5
<b>Figure I.3.</b> Orientation pour un meilleur gain. [9] .....	7
<b>Figure I.4.</b> Le choix de la meilleure disposition d'une maison selon l'orientation et la topographie de site [13] .....	8
<b>Figure I.5.</b> Comparaison des températures intérieures simulées des différentes orientations pendant la période [13] .....	8
<b>Figure I.6.</b> Le patio dar Mustapha Pacha [14] .....	9
<b>Figure I.7.</b> Illustration du refroidisseur par évaporation [16] .....	9
<b>Figure I.8.</b> Refroidissement de l'air par évaporation d'eau [20] .....	10
<b>Figure I.9.</b> Illustration de l'utilisation de l'inertie thermique de plancher avec MCP pendant la journée (a) et pendant la nuit (b) [21] .....	11
<b>Figure I.10.</b> Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase [23] .....	11
<b>Figure I.11.</b> Classification des matériaux à changement de phase .....	12
<b>Figure I.12.</b> Comparaison entre une construction bien isolée et non isolée [29] .....	14
<b>Figure I.13.</b> Illustration de la ventilation naturelle par ventilation transversale et par cheminée verticale [35] .....	15
<b>Figure I.14.</b> Évolution de la température de confort en fonction de la température mensuelle moyenne pour les bâtiments climatisés et ceux à ventilation naturelle [38] .....	16
<b>Figure I.15.</b> Protection solaire horizontale et verticale [40] .....	17
<b>Figure I.16.</b> Flux de chaleur à travers la dalle des cellules test enregistrés pendant la période (a)-la plus ensoleillée (b)-nuageuse (c)-la plus chaude [32] .....	18
<b>Figure I.17.</b> Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain [41] .....	18
<b>Figure I.18.</b> Mur végétal extérieur [44] .....	19
<b>Figure I.19.</b> Les systèmes de végétalisation verticale (a)-Façade verte directe (b)- Murs vivants à base de jardinières - (c) Murs vivants à base de laine minérale [45] .....	19
<b>Figure I.20.</b> Comparaison de la charge de climatisation dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence avec la charge obtenue pour les bâtiments isolés pour le mois de juillet et le climat d'Athènes [51] .....	21
<b>Figure I.21.</b> Toiture végétalisée [14] .....	21
<b>Figure I.22.</b> L'effet du cool-roof [37] .....	22
<b>Figure I.23.</b> Répartition cumulée de la différence de température de l'air dans les salles d'essai avant et après le revêtement de la toiture .....	23
<b>Figure I.24.</b> Évolution des températures de l'air extérieur et intérieur pour le bâtiment non climatisé [57] .....	24
<b>Figure I.25.</b> Fonctionnement d'un puit canadien [58] .....	24
<b>Figure I.26.</b> Description des principaux composants du mur trombe [61] .....	25
<b>Figure I.27.</b> Énergie auxiliaire annuelle due à la paroi de Trombe [68] .....	26
<b>Figure I.28.</b> Fonctionnement du plancher solaire [70] .....	27
<b>Figure II.1</b> Paramètres physiques influençant les pertes thermiques du corps humain [9] .....	35
<b>Figure II.2</b> Échanges des chaleurs liées à l'habillement d'un individu [11] .....	37
<b>Figure II.3</b> Le pourcentage de PPD en fonction de la PMV [18] .....	39
<b>Figure II.4</b> Tableau psychrométrique adapté de Givoni [25] .....	41

<b>Figure III.1.</b> Diagramme psychrométrique de GIVONI,1992 [3].....	53
<b>Figure III.2.</b> Stratégies de Confort Thermique : Une Approche Psychrométrique.....	54
<b>Figure III.3.</b> Classification du climat en Algérie [6].....	55
<b>Figure III.4.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Alger.....	57
<b>Figure III.5.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine.....	58
<b>Figure III.6.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Relizane.....	60
<b>Figure III.7.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Sétif.....	61
<b>Figure III.8.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Bechar.....	62
<b>Figure III.9.</b> Diagramme psychrométrique de la ville de Tamanrasset.....	63
<b>Figure III.10</b> Effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique dans les différentes villes. ....	65
<b>Figure III.11.</b> Pourcentage de temps de confort avant et après mise en œuvre des protections solaires.....	66
<b>Figure III.12.</b> Effet de l'augmentation de l'inertie thermique sur le confort.....	67
<b>Figure III.13.</b> Impact du chauffage solaire passif sur le confort thermique.....	68
<b>Figure IV.1.</b> (a) description du local (b) description des fenêtres [1].....	72
<b>Figure IV.2.</b> Paramètres d'entrée « Type 56 ».....	74
<b>Figure IV.3.</b> Définitions des orientations et des zones.....	75
<b>Figure IV.4.</b> Définition des paramètres thermo physique des couches.....	76
<b>Figure IV.5.</b> Définition du mur.....	76
<b>Figure IV.6.</b> Définition des fenêtres.....	77
<b>Figure IV.7.</b> Définition des parois constituant une zone.....	78
<b>Figure IV.8.</b> Définitions des outputs pour le calcul des besoins énergétiques.....	78
<b>Figure IV.9.</b> Interface TRNstudio avec schéma pour la simulation.....	80
<b>Figure IV.10.</b> Topologie des Types sur TRNSYS.....	80
<b>Figure IV.11.</b> Pourcentage de temps de Confort avant et après mise en œuvre de la ventilation naturelle nocturne.....	85
<b>Figure IV.12.</b> Pourcentage de temps de Confort avant et après mise en œuvre des protections solaires.....	86
<b>Figure IV.13.</b> Effet de l'augmentation de l'inertie thermique sur le confort thermique.....	87
<b>Figure IV.14.</b> Taux d'amélioration du confort après l'augmentation de la surface des fenêtres munies de protections solaires.....	89
<b>Figure IV.15.</b> Pourcentage de temps de confort obtenu sans aucune stratégie dans chaque ville par les deux approches.....	89
<b>Figure IV.16.</b> Pourcentage de temps de confort après la mise en œuvre de la ventilation naturelle dans chaque ville par les deux approches.....	90
<b>Figure IV.17.</b> Pourcentage de temps de confort après la mise en œuvre des protections solaires dans chaque ville par les deux approches.....	91
<b>Figure IV.18.</b> Pourcentage de temps de confort après l'augmentation de l'inertie thermique dans chaque ville par les deux approches.....	91
<b>Figure IV.19.</b> Pourcentage de temps de confort après l'intégration du chauffage solaire passif dans les villes par les deux approches.....	92

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Avantages des différentes catégories de MCP.....	12
<b>Tableau II.1.</b> Catégories recommandées et PPD-PMV pour les bâtiments à conditionnement mécanique [19].....	39
<b>Tableau II.2</b> Zones du confort intérieur du diagramme psychométrique [13] .....	41
<b>Tableau II.3.</b> La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique [32]	44
<b>Tableau II.4.</b> Consommation finale par produit [34] .....	46
<b>Tableau II.5.</b> Consommation finale par secteur [34] .....	46
<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques principales de chaque zone climatique.....	55
<b>Tableau III.2.</b> Températures moyennes (T°) et humidités (HR) mensuelles des différentes villes représentatives.....	56
<b>Tableau III.3.</b> Les périodes d'été et d'hiver pour les différentes zones climatiques.....	57
<b>Tableau III.4.</b> Temps de confort sans et avec la ventilation naturelle dans les différentes villes .....	64
<b>Tableau III.5.</b> Potentiel des dispositifs d'ombrages dans les différentes villes .....	65
<b>Tableau III.6.</b> Potentiel de l'inertie thermique pour le confort d'été .....	66
<b>Tableau III.7.</b> Potentiel de chauffage solaire passif pour le confort .....	67
<b>Tableau IV.1.</b> Composition du mur extérieur .....	72
<b>Tableau IV.2.</b> La composition du toit .....	73
<b>Tableau IV.3.</b> Composition du plancher (Sol).....	73
<b>Tableau IV.4.</b> Caractéristiques des portes et fenêtres.....	73
<b>Tableau IV.5.</b> Pourcentages de temps de confort dans chaque ville durant les deux saisons. ....	83
<b>Tableau IV.6.</b> Scénarios d'ouverture des fenêtres par ville .....	84
<b>Tableau IV.7.</b> Temps de confort sans et avec la ventilation naturelle dans les différentes villes. ....	84
<b>Tableau IV.8.</b> Potentiel des protections solaires dans les différentes villes. ....	85
<b>Tableau IV.9.</b> Les caractéristiques du matériau .....	86
<b>Tableau IV.10.</b> Potentiel de l'inertie thermique pour le confort d'été.....	87
<b>Tableau IV.11.</b> Effet de l'augmentation de la surface de vitrages sur le confort .....	88
<b>Tableau IV.12.</b> Effet de toutes les stratégies sur le temps de confort annuel estimé par les deux approches.....	92

## **Introduction générale**

L'Algérie, pays aux vastes étendues et aux climats variés, fait face à des défis croissants en matière de gestion énergétique, particulièrement dans les secteurs résidentiels. La demande en énergie pour le chauffage et le rafraîchissement ne cesse d'augmenter, exacerbée par les fluctuations saisonnières et les extrêmes climatiques. Le secteur résidentiel, réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation globale est en outre, représente 36% des émissions totales de gaz à effet de serre. La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale [1].

Les stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement sont des approches efficaces pour réduire les besoins énergétiques et améliorer le confort des occupants. Ces stratégies consistent à utiliser les caractéristiques environnementales pour réguler la température et l'humidité à l'intérieur des bâtiments. Les stratégies passives tirent parti des propriétés intrinsèques des matériaux, de l'orientation des bâtiments et des interactions climatiques pour offrir un confort thermique optimal tout en minimisant l'empreinte énergétique.

Ce travail de fin d'études s'attache à explorer différentes stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement, ainsi que le potentiel de ces stratégies en Algérie. À travers quatre chapitres, nous aborderons successivement les aspects théoriques et pratiques de ces stratégies, en comparant deux approches distinctes : les méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement, mettant en lumière les principaux concepts en relation avec le bâtiment et celle intégrées à ce dernier. Ces techniques, qui incluent l'orientation du bâtiment, l'utilisation de matériaux appropriés, et la gestion des ouvertures pour la ventilation naturelle, sont cruciales pour minimiser l'utilisation d'énergie tout en assurant des conditions intérieures confortables.

Le deuxième chapitre explore les différentes dimensions du confort thermique, en commençant par sa définition et les paramètres qui l'influencent. Les différents outils utilisés pour l'évaluation du confort thermique sont également présentés. En outre, quelques normes et réglementations internationales (ISO, ASHRAE) et algériennes sont abordées. L'utilisation des normes vaut tant pour l'appréciation et l'amélioration de conditions thermiques existantes que pour la conception de nouvelles conditions.

L'analyse bioclimatique pour les différentes zones climatiques distinctes en Algérie est réalisée en chapitre 3. Le logiciel Climate Consultant a été utilisé afin de déterminer les stratégies passives les plus efficaces pour chaque zone en fonction des caractéristiques climatiques locales. Les données relatives au climat (températures, rayonnement total incident, humidités relatives...) de chaque région ont été tirées de [climate.onebuilding.org](http://climate.onebuilding.org) qui est un référentiel largement utilisé de données météorologiques, couvrant plus de 17 476 lieux dans le monde. Il est développé et géré par Dru Crawley et Linda Lawrie [[climate.onebuilding.org](http://climate.onebuilding.org)].

Dans le dernier chapitre, le potentiel de quelques stratégies passives a été évalué par la simulation dynamique en utilisant le logiciel TRNSYS, un logiciel de simulation énergétique avancé. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats de l'analyse psychrométrique. Cette comparaison vise à évaluer la pertinence des outils graphiques dans les différents climats.

À travers ces différents chapitres, ce mémoire vise à apporter un éclairage approfondi sur les enjeux et les solutions liés à la maîtrise des conditions thermiques dans les bâtiments dans différents contextes climatiques, en combinant analyse théorique, outils de simulation et étude de cas spécifiques. Ainsi, ce mémoire se propose non seulement de comparer des méthodologies scientifiques mais aussi de contribuer à un futur énergétique plus résilient et durable pour l'Algérie, en tirant parti des riches ressources climatiques du pays. En explorant et en validant des solutions qui sont à la fois économiquement viables et écologiquement responsables, cette recherche aspire à jouer un rôle clé dans la transition énergétique de l'Algérie, tout en améliorant la qualité de vie de ses habitants.

---

[1] Kazeoui H et al, article, 2023, Study of the performance of passive cooling strategies in buildings under arid weather conditions.

**CHAPITRE I**  
**LES STRATÉGIES PASSIVES DE CHAUFFAGE ET**  
**DE RAFRAICHISSEMENT**

## I.1 Introduction

Le passif repose sur un concept de construction très basse consommation basée sur l'utilisation de l'apport de chaleur du soleil et sur une isolation très performante (des murs, des fenêtres...), l'absence de ponts thermiques et une grande étanchéité à l'air.

Les stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement dans la construction visent à optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments en exploitant des techniques innovantes. Ces approches incluent l'utilisation de méthodes naturelles pour réguler la température interne des bâtiments, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes traditionnels de chauffage et de climatisation.

Les stratégies passives peuvent être classées en :

- Stratégies en relation avec le bâtiment ;
- Les techniques intégrées au bâtiment.

## I.2 Les stratégies en relation avec le bâtiment

### I.2.1 L'enveloppe du bâtiment

La forme et la composition volumétrique de l'enveloppe a un effet sur son exposition et ses pertes thermiques. Des plans inclinés et des formes à volumes multiples tendent à augmenter la surface de l'enveloppe. La forme du bâtiment a une forte influence sur la consommation énergétique, notamment à travers le coefficient de forme (compacité), qui est défini comme le rapport entre la surface exposée et le volume protégé de ce bâtiment. Plusieurs études ont montré que la perte ou la conservation de la chaleur à partir de l'enveloppe du bâtiment est liée à ce rapport. Une très bonne compacité varie suivant la forme, la taille et le mode de contacts [1]. Il a été montré que la mitoyenneté et l'habitat collectif favorisent la réduction des déperditions (Figure I.1).

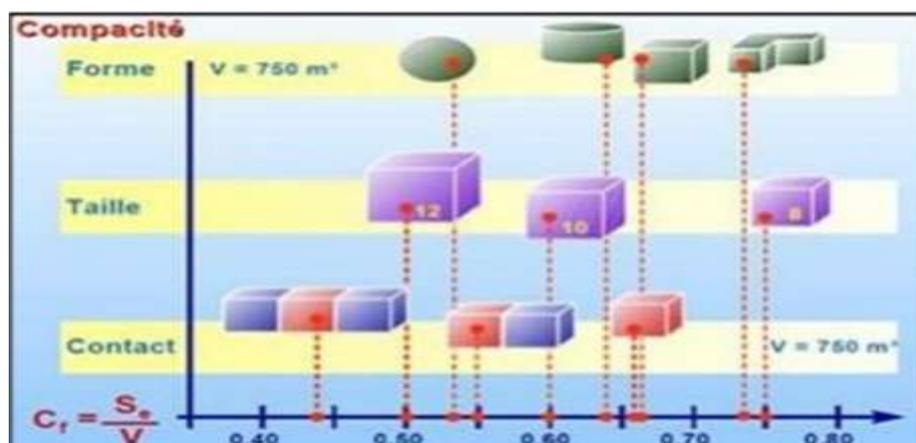
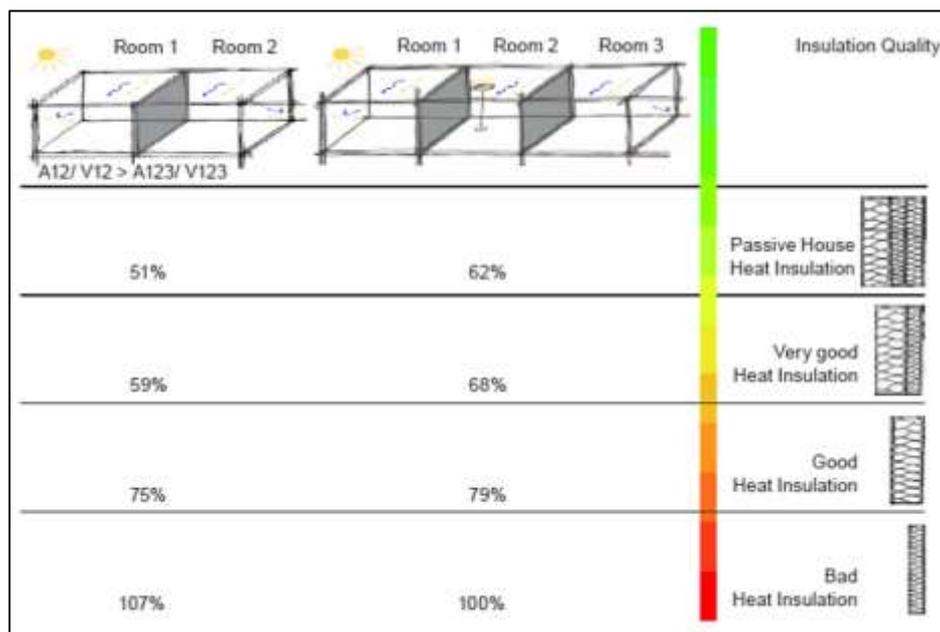


Figure I.1. Impact de la forme, de la taille et de la proximité d'autres volumes sur la compacité de formes simples [2]

❖ **Rapport : surface/volume : (RSV)**

C'est le rapport entre la surface extérieure de l'enveloppe d'un bâtiment et le volume protégé par cette enveloppe. Son but est de comparer les différentes formes en terme de leurs efficacités. Un bâtiment compact implique un RSV faible. C'est-à-dire, il se caractérise par une faible perte de la chaleur.

Ce rapport-là est spécifique que pour la surface extérieure de l'enveloppe d'un bâtiment car elle est la plus exposée aux variations des températures et des vents. Il n'exprime jamais la performance de l'usage de l'espace habitable (Figure I.2).



**Figure I.2.** L'influence du rapport de la surface de l'enveloppe (A) sur le volume d'une chambre (V) sur l'énergie primaire dans une chambre selon des différentes qualités de l'isolation [3]

Plusieurs recherches ont été réalisées afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans les bâtiments en se concentrant sur l'enveloppe du bâtiment, considérée comme la barrière physique entre les environnements extérieurs et intérieurs.

- (Huang, 2016) a examiné plusieurs études sur l'optimisation de la conception de l'enveloppe des bâtiments. Il a comparé les algorithmes d'optimisation populaires et synthétise les objectifs ciblés. Les résultats statistiques mettent en évidence les limites de ce domaine de recherche et suggèrent des avancées potentielles, il a conclu que

Le rôle de l'enveloppe des bâtiments dans le confort thermique est important, il sépare l'environnement intérieur du bâtiment de l'environnement extérieur, offrant ainsi aux habitations des espaces de vie stables et confortables [4].

- (Baglivo et al 2017) a optimisé la conception de l'enveloppe d'un nouveau bâtiment résidentiel situé dans un climat chaud (le sud de l'Italie). Il a analysé son comportement thermique en considérant plusieurs compositions de l'enveloppe. Il a montré que l'enveloppe du bâtiment

joue un rôle crucial dans le confort thermique en contrôlant les échanges entre l'intérieur et l'extérieur, elle permet de réduire les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été [5].

- (Chen et al, 2018) ont conclu dans leurs articles que l'enveloppe thermique d'un bâtiment joue un rôle crucial dans le confort intérieur en influençant la résistance thermique et la gestion des gains solaires. Elle aide à maintenir des températures intérieures stables et à réduire les charges de chauffage et de refroidissement. Une enveloppe bien conçue peut améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique des occupants [6].

A l'échelle nationale, plusieurs études ont été menées également dans ce sens.

- (Medjelekh, 2006) a travaillé sur le rôle de l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment sur la consommation énergétique et le confort thermique dans le climat semi-aride de la ville de Guelma. Elle a démontré que sous le climat de Guelma, une enveloppe à forte inertie thermique peut améliorer la sensation de confort hygrothermique intérieur et la consommation énergétique du bâtiment [7].
- (Benhara, 2016) a souligné l'importance d'une conception soignée de l'enveloppe du bâtiment pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique, il a démontré que l'enveloppe d'un bâtiment joue un rôle crucial dans la régulation thermique. Une enveloppe bien conçue peut réduire les besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation, améliorant ainsi le confort thermique intérieur [3].
- (Latrech Siham, 2019), dans sa recherche visant à améliorer la performance climatique des habitats individuels autoproduits à Biskra, conclut que pour assurer un niveau de confort thermique acceptable à l'intérieur des habitations, l'enveloppe du bâtiment est un élément clé. Le comportement thermique de tous les composants de l'enveloppe vis-à-vis des températures extérieures torrides, joue un rôle déterminant pour la réalisation des conditions de confort dans l'espace intérieur. Une conception climatiquement performante de l'enveloppe dans les régions chaudes et arides permet de minimiser les apports de chaleur qui s'infiltreraient à l'intérieur [8].

### **1.2.2 Orientation du bâtiment**

Dans son livre *l'homme, l'architecture et le climat*, GIVONI B. a attesté que plusieurs facteurs influent sur le choix de l'orientation, tels que : la vue dans différentes directions, la position du bâtiment par rapport aux voies, la topographie du site, la position des sources de nuisance, et la nature du climat. Ce dernier a une influence importante sur l'ambiance intérieure du bâtiment en considérant l'ensoleillement, l'éclairage, la ventilation, et le confort.

L'orientation solaire est une stratégie clé dans la conception bioclimatique des bâtiments, visant à tirer parti de l'énergie solaire naturelle pour le chauffage pendant les mois d'hiver.

Une bonne étude des contraintes permet de bien orienter le bâtiment, et de le rendre performant et confortable, permettant ainsi de contrôler son efficacité énergétique et réduire la consommation du chauffage, de climatisation et d'éclairage.

L'idée principale est de positionner les parties principales du bâtiment, comme les salons et les chambres, de manière à maximiser l'exposition au soleil pendant la saison froide. Cela permet de capturer un maximum de lumière solaire directe, exploitant ainsi la chaleur générée par le rayonnement solaire. Les recommandations suivantes peuvent être lues :

- L'orientation Sud, ou proche du Sud doit être recherchée pour la façade principale de tout habitat. En hiver, elle est la plus ensoleillée et en été la moins ensoleillée et la mieux protégée par de protections solaires (Figure I.3).

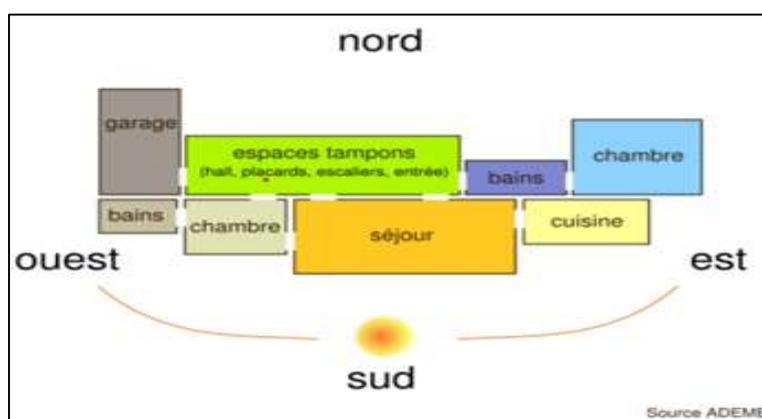


Figure I.3. Orientation pour un meilleur gain. [9]

- L'orientation Est ou Ouest, ou proche de l'Est ou Ouest est déconseillée pour la façade principale de tout habitat. En été, l'insolation est très forte et difficile à protéger néanmoins, l'orientation est admissible en y adjoignant des dispositions de protection. L'orientation Nord est à éviter sauf pour les zones climatiques à forte insolation, des dispositions de protections solaires sont à prévoir en été pour les basses latitudes [10].

Une équipe de recherche ont conclu que la maison symétrique doit faire face aux quatre points cardinaux or dans la maison allongée le côté long est orienté au sud. Finalement, pour abaisser la température à des limites acceptables en été, il ne suffit pas de baser que sur le recours vers l'utilisation de la ventilation uniquement [11]. D'après l'étude de Khambadkone et al., le potentiel de confort et la sévérité climatique de trois emplacements ont été évalués ce dernier augmente de 25 à 46 % du temps de l'année avec le changement géographique de position du nord vers le sud [12]. En outre, certaines études montrent que le seul fait de concevoir une habitation en tenant compte correctement de l'orientation diminue de 15% à 30% les besoins de chauffage et donc, de la consommation d'énergie [13].

Les résultats de l'analyse bioclimatique de la ville de Biskra, effectuée par Berghout.B démontre que pendant l'hiver, l'influence de l'orientation demeure visible, en particulier pour les orientations semi-cardinales (Figure I.4).

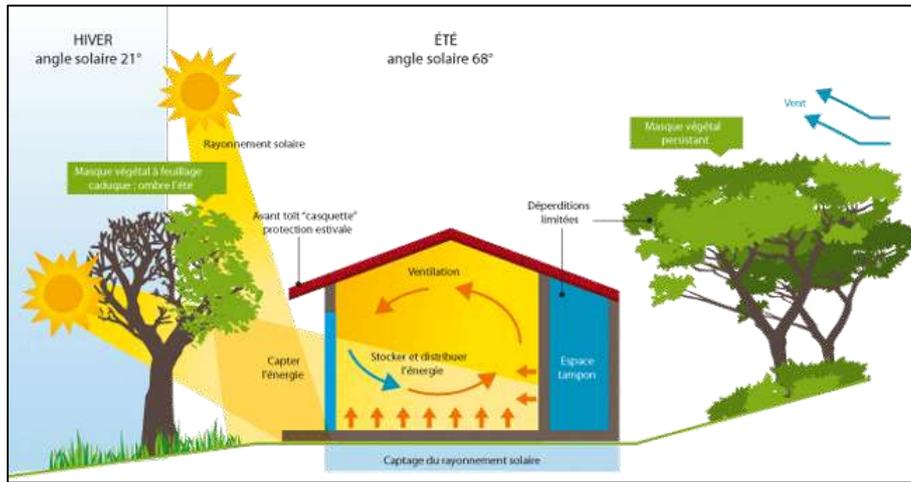
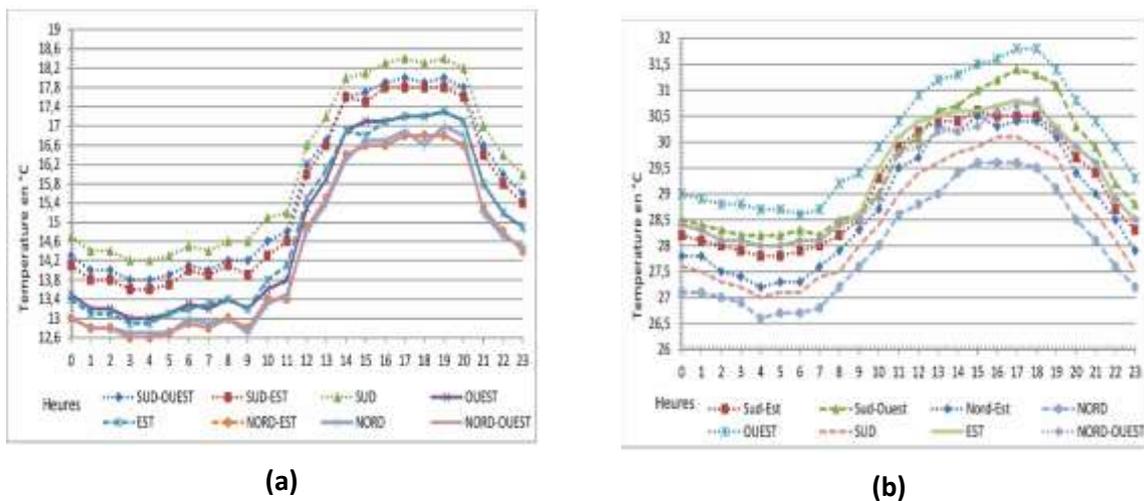


Figure I.4. Le choix de la meilleure disposition d'une maison selon l'orientation et la topographie de site [13]

Dans sa thèse de doctorat, Berghout [13] a étudié l'effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur dans le cas de Biskra, Algérie. Il a constaté que l'orientation influence significativement les conditions intérieures, surtout durant l'été. Les orientations semi-cardinales (Sud-Est, Nord-Est, Sud-Ouest) montrent des variations de température notables, avec une diminution allant jusqu'à 2°C entre les meilleures et les pires orientations. En été, les orientations Nord et Sud sont les plus favorables, tandis que les orientations Ouest et Est sont à éviter en raison des hausses de température. En hiver, l'orientation Sud est la plus favorable grâce à une meilleure absorption de l'énergie solaire, tandis que les orientations Nord, Nord-Est et Nord-Ouest sont à éviter en raison des basses températures (Figure I.5).



(a)

(b)

Figure I.5. Comparaison des températures intérieures simulées des différentes orientations pendant la période [13]

(a) HIVER

(b) ETE

### I.2.3 Ajouts des fontaines

Les fontaines produisent un effet de fraîcheur due à l'évaporation de l'eau. En effet le changement de phase par évaporation nécessite une absorption de chaleur provoquant une diminution de la température sèche et un effet de fraîcheur (Figure I.6).

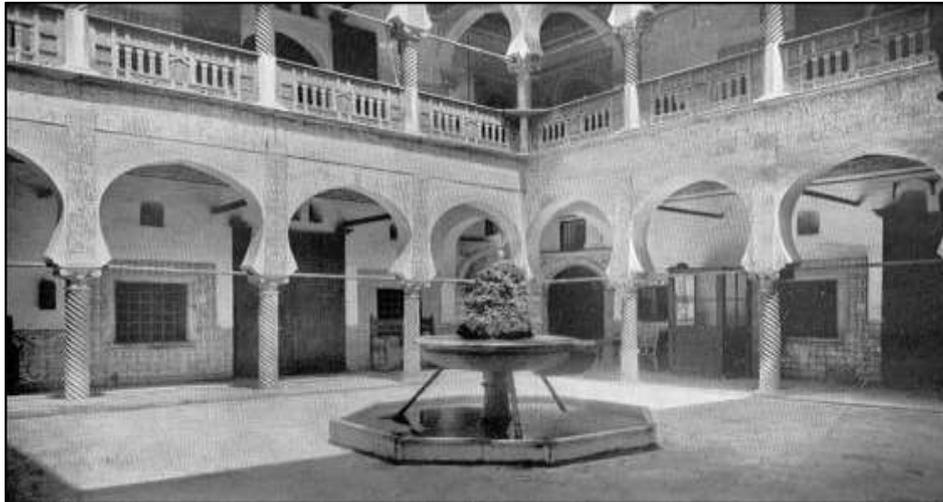


Figure I.6. Le patio dar Mustapha Pacha [14]

Le principe de refroidissement par évaporation est basé sur la technologie de refroidissement par air évaporatif à eau. Une fois que l'eau s'évapore, elle absorbe la chaleur de l'air et le refroidit progressivement, de sorte que la chaleur absorbée lors de l'évaporation est transférée à l'air sous forme de chaleur latente, après l'évaporation de l'eau. En conséquence, l'humidité de l'air augmente et la température diminue (Figure I.7) [15].

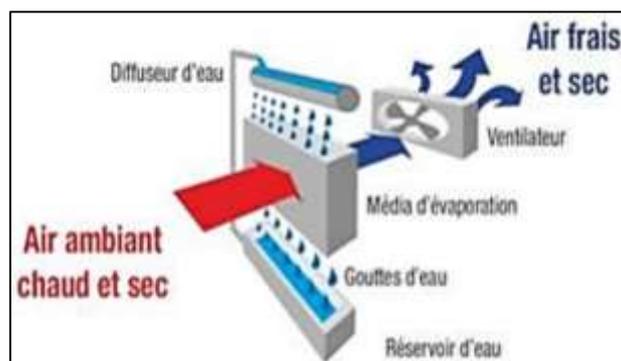


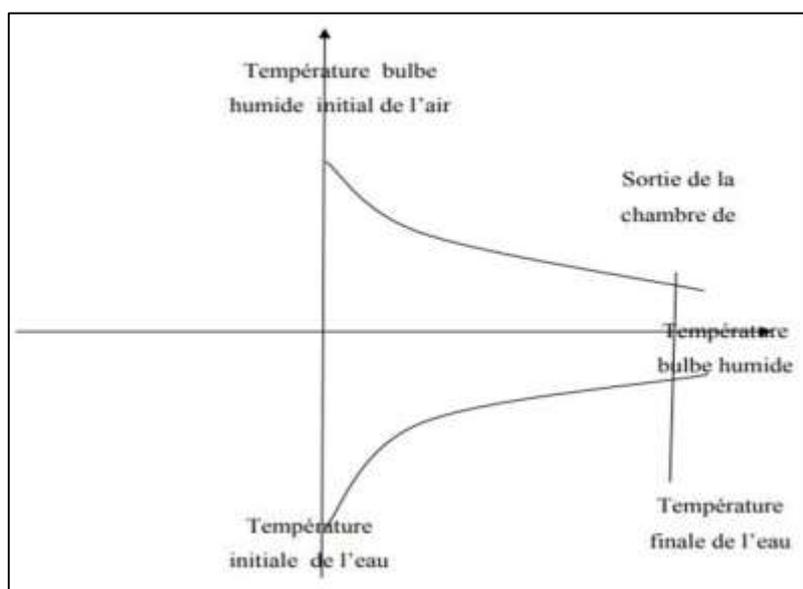
Figure I.7. Illustration du refroidisseur par évaporation

Il est courant d'observer l'utilisation de fontaines dans les espaces publics des villes, ce qui permet d'améliorer localement le confort thermique des piétons. Au Japon, on recourt à une méthode traditionnelle appelée « Uchimizu » pour se rafraîchir. Cette technique se base sur les brumisateurs (spray d'eau) et sur l'évaporation de l'eau pour créer un refroidissement, cette méthode permet de réduire l'îlot de chaleur urbain (dans les conditions climatiques du Japon) en diminuant la température ambiante de 2 °C [17].

L'utilisation de surfaces d'eau, la présence de bassins d'eau, de fontaines ou de jet d'eau, ou même la mise en place de surfaces minérales poreuses avec circulation d'eau contribue à diminuer l'îlot de chaleur urbain. L'évaporation de quelques gouttes d'eau dans un courant d'air rend ce dernier plus humide et favorise le rafraîchissement de la zone étudiée. Ces techniques de refroidissement évaporatif ont permis de réduire en moyenne la température ambiante à Séville de 5 °C [18].

Les travaux de Nikolopoulo ont montré que la mise en place des fontaines, des étangs et des piscines au village olympique d'Athènes, ont permis de baisser la température ambiante de 4 °C [19].

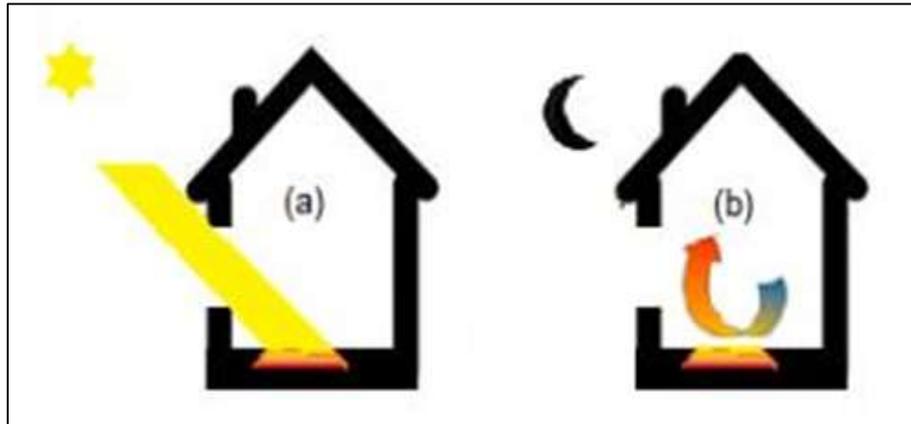
Le manuel de climatisation Trane, publié par The Trane Company en 1987 [20], présente une analyse détaillée des processus de refroidissement évaporatif, illustrée par un graphique spécifique. Ce graphique montre les variations de la température du bulbe humide de l'air et de l'eau à la sortie de la chambre de refroidissement. Comme indiqué dans la figure ci-dessous, la température initiale du bulbe humide de l'air diminue progressivement en traversant la chambre, tandis que la température de l'eau augmente légèrement avant d'atteindre un équilibre à la sortie. Cette représentation visuelle aide à comprendre l'efficacité du refroidissement évaporatif dans les systèmes de climatisation (Figure I.8).



**Figure I.8.** Refroidissement de l'air par évaporation d'eau [20]

#### I.2.4 Matériaux de construction

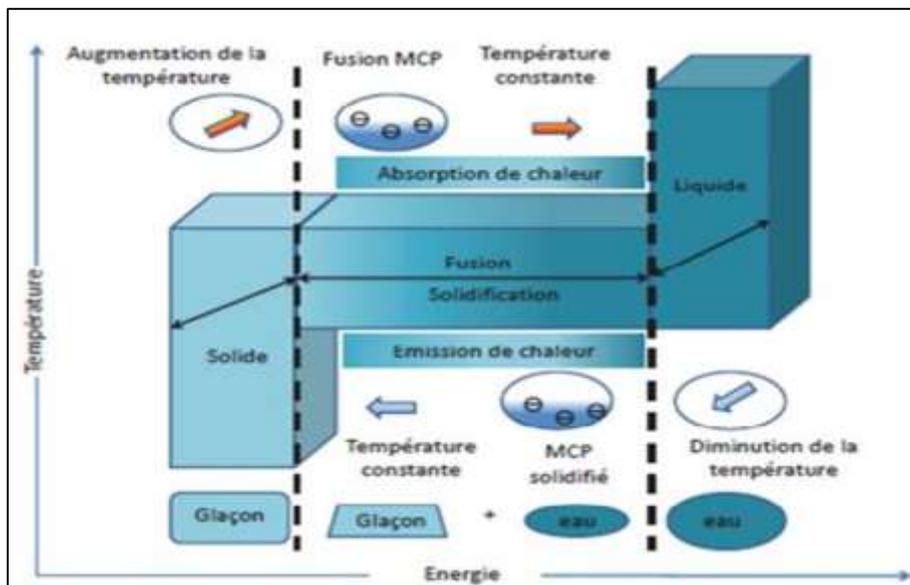
Ces dernières années, de nombreuses études se sont attelées à démontrer l'intérêt de l'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les parois de bâtiment. Ce type de paroi permet, pendant la journée, de stocker une partie de la chaleur du rayonnement solaire à travers le processus de fusion et ainsi d'améliorer le confort thermique sans la nécessité d'utiliser la climatisation. La nuit, le MCP se solidifie et libère la chaleur emmagasinée (Figure I.9) [21].



**Figure I.9.** Illustration de l'utilisation de l'inertie thermique de plancher avec MCP pendant la journée (a) et pendant la nuit (b) [21]

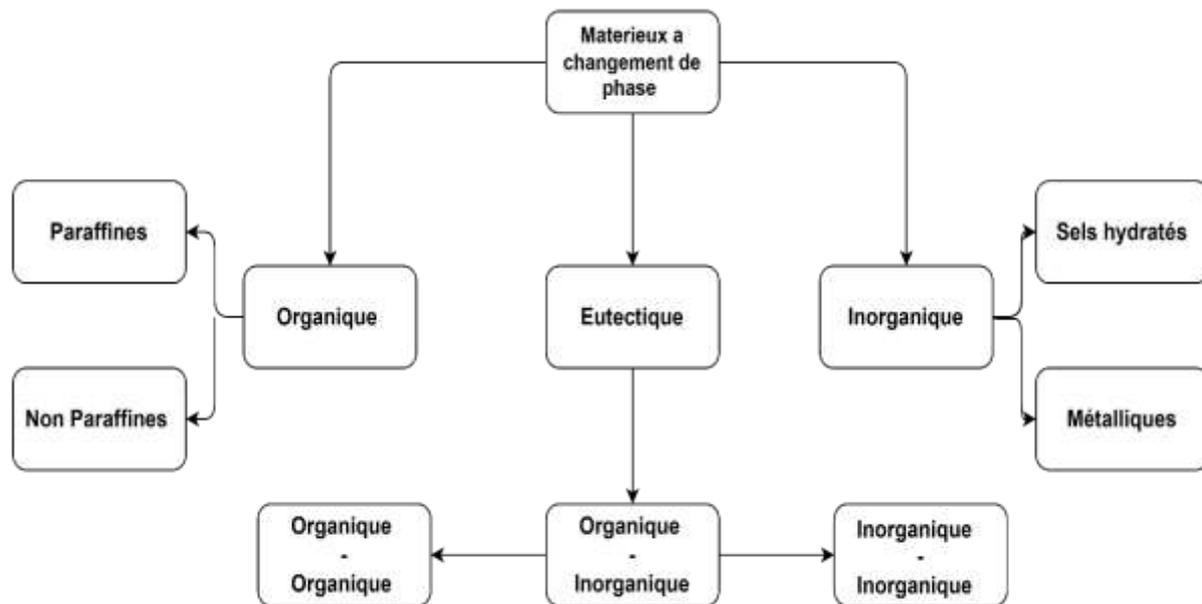
De par leur capacité à amortir et déphaser, les MCP permettent de réduire la température maximale de l'environnement intérieur, de réduire les températures excédentaires au-delà de la gamme de confort thermique, d'améliorer les performances énergétiques globales du bâtiment et d'augmenter la résistance thermique comme une couche isolante.

Ce sont des substances dont les propriétés physiques subissent des transitions remarquables en réponse à des variations de température ou de pression. Ces transitions entraînent des changements significatifs dans des caractéristiques telles que la conductivité thermique, la capacité thermique, et la densité. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la Figure I.10 [22].



**Figure I.10.** Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase [23]

Les différentes familles des MCP sont résumés dans la figure I.11.



**Figure I.11.** Classification des matériaux à changement de phase  
[Source : auteurs]

Le tableau suivant résume les principaux avantages des différentes classes de MCP (Tableau I-1).

**Tableau I.1.** Avantages des différentes catégories de MCP

AVANTAGES		
ORGANIQUES	INORGANIQUES	EUTECTIQUES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Large plage de températures</li> <li>- Pas de ségrégation de phase</li> <li>- Stabilité chimique</li> <li>- Haute énergie de fusion</li> <li>- Écologique</li> <li>- Recyclable</li> <li>- Compatibilité avec les matériaux de construction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande chaleur de fusion</li> <li>- Disponibilité</li> <li>- Faible coût</li> <li>- Point de fusion bien défini</li> <li>- Non inflammables</li> <li>- Haute conductivité thermique</li> <li>- Faible dilatation volumique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Point de fusion précis</li> <li>- Chaleur latente et densité de stockage volumétrique supérieure</li> </ul>

L'étude expérimentale menée par HESSAD Ahmed sur la comparaison entre une cabine intégrant des MCP (RT-27) et une cabine sans MCP conduit à une réduction de 15 % de la consommation électrique. Pour la cabine intégrant un MCP ayant une température de changement de phase de 25°C, une réduction de 17 % de la consommation électrique a été obtenue [23].

Par rapport aux MCP dans les rideaux, Buddhi et al. [24] ont étudié la performance thermique d'une cellule d'essai (1m x 1m x 1m) avec ou sans matériaux à changement de phase. Le MCP utilisé était l'acide laurique (température de fusion de 49°C). Au cours de ces essais, ils ont constaté que la température de l'air dans la cellule augmente jusqu'à 4°C pour 4-5 heures de fonctionnement nocturne.

Harald Mehling [25] a présenté son rapport de projet lors de la 8e réunion d'experts et atelier à Kizkalesi, en Turquie, sur les « Technologies innovantes de PCM » et a suggéré d'utiliser les volets PCM avec les fenêtres. Ce qui permet de décaler le pic de température diurne de 3 heures et d'abaisser la température du bâtiment de 2°C sur cette période diurne.

Saffari et al. [26] ont montré que l'inclusion de PCM pouvait réduire de 10 à 62 % la consommation d'énergie en fonction de la zone climatique.

L'étude menée par Qudama [27] sur le couplage Ventilation nocturne-MCP a montré que la charge de refroidissement a été réduite de 11.5 %, 40.2 % et 59.8 % lorsque la ventilation nocturne a été appliquée avec 1, 3 et 5 renouvellements d'air par heure, respectivement alors qu'elle a été réduite de 19.5 %, 78.2 % et 95.5 % lorsque la ventilation nocturne est couplée à une épaisseur de MCP de 4 mm.

Des mesures in-situ ont été réalisées par L. DERRADJI en période d'hiver pour déterminer les températures de l'air et de parois de trois cellules. Les résultats montrent que l'utilisation d'un enduit en plâtre intégrant 30 % MCP a permis d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale des cellules de 2 °C en période d'hiver. Il a conclu que l'incorporation de MCP avec le plâtre comme enduit donne une réelle opportunité de réaliser des économies d'énergie pour les bâtiments en Algérie [28].

### **1.2.5 Isolation thermique**

L'isolation thermique de l'enveloppe permet de réduire les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Elle joue un rôle crucial dans la gestion de la température intérieure, améliorant l'efficacité énergétique et le confort des occupants, son objectif principal est de minimiser les pertes de chaleur en hiver et de limiter les gains de chaleur en été.

La demande énergétique annuelle d'un bâtiment pour le chauffage et le refroidissement est affectée dans une certaine mesure par la stabilité thermique du bâtiment lui-même.

La stabilité thermique d'un bâtiment désigne la capacité de cet édifice à maintenir un niveau constant de confort tout au long de l'année, en particulier pendant les périodes de fortes fluctuations de températures extérieures, elle dépend des réponses dynamiques de tous les composants de l'enveloppe du bâtiment.

Plusieurs zones peuvent faire l'objet de travaux d'isolation : la toiture, les combles, les murs, les fenêtres, le plancher (Figure I.12).

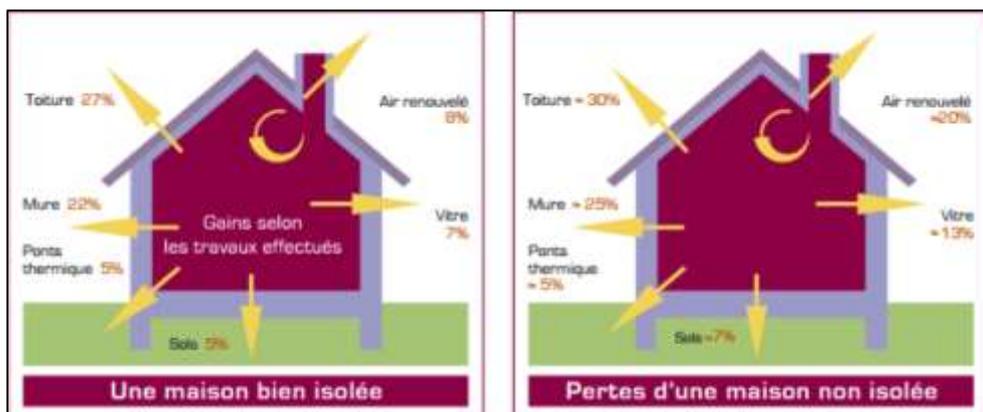


Figure I.12. Comparaison entre une construction bien isolée et non isolée [29]

D'après H. BENHARRA, un toit bien isolé offre un temps de déphasage de 6 heures ou plus [3].

L'étude menée par Mohsen et al. a montré que l'économie d'énergie peut atteindre 77 % en utilisant le polystyrène dans l'isolation des murs et du toit [30]. Guechati et al. [31] ont réalisé une étude similaire sur l'impact de l'isolation thermique sur la consommation d'énergie d'un bâtiment à Oujda. Les chercheurs ont examiné différentes options et ont conclu que l'utilisation de 6 cm de polystyrène pour isoler le toit et les murs extérieurs permet de diminuer de 16.4% la charge de chauffage.

Les travaux de thèse de S. KACHKOUCH ont montré que la température du plafond isolé (avec Polystyrène expansé (EPS)) a été abaissée de 9.9°C par rapport au cas du plafond non isolé. En hiver, l'isolation thermique a permis de réduire la charge annuelle de chauffage de 67% [32].

L'étude menée par NECIB et al. sur une salle d'enseignants située à l'université de Ouargla a montré que la toiture est responsable de 70.62% des gains thermiques globales, 27.11% des gains sont reçus par les murs et 2.27% par les fenêtres. L'effet de l'isolation thermique de la toiture par le Liège ou le gravier ainsi que l'isolation des murs par différentes épaisseurs de polystyrène a été étudié. Il a été montré que 5cm d'isolation combinée de la toiture et des murs avec du liège et du polystyrène respectivement peut réduire jusqu'à 59.09% le gain thermique globale et jusqu'à 69.96% avec une épaisseur de 10cm [33].

Une étude thermique et énergétique d'un centre psychopédagogique dans la ville d'Oujda (Maroc) a abouti aux résultats suivants [31] :

- L'introduction de l'isolation entraîne une diminution remarquable des besoins de chauffage par rapport à l'état actuel. L'isolation de la toiture par 6 cm de polystyrène expansé réduit les besoins d'énergie de 13.34 %.
- L'isolation extérieure est énergétiquement meilleure que l'isolation intérieure ou au milieu, car elle permet d'emmagasiner la chaleur des gains internes et des gains solaires dans le mur (inertie thermique). Les réductions de l'énergie obtenues respectivement sont 16.36 %, 15.4 % et 16.3 %.
- L'utilisation de la paille compactée entre la double cloison permet de réduire les besoins de 13.81 % par rapport l'état original.

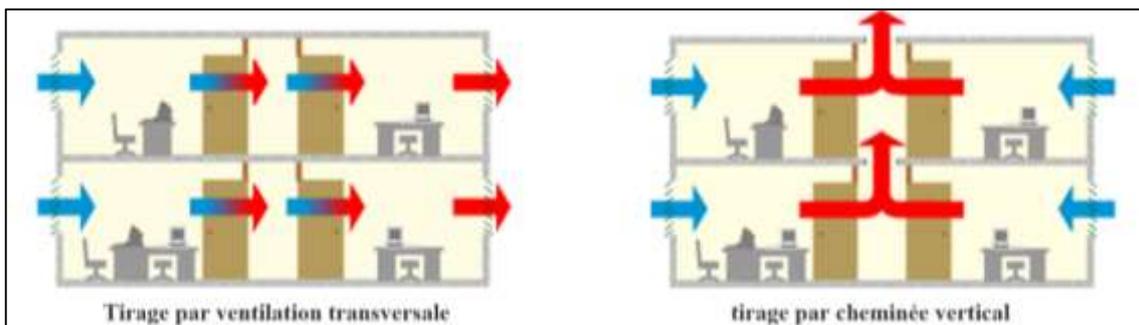
Dans le même contexte, l'étude de Medjelekh. D [34] a montré que l'introduction d'un matériau isolant dans la lame d'air de la paroi extérieure en brique creuse permet un abaissement de la température intérieure. Avec la lame d'air, la température ambiante fluctue entre 29.67 °C et 33.27 °C, soit une amplitude de 3.60 °C. Tandis qu'avec le feutre la température intérieure varie entre 29.30 °C et 32.07°C, soit une amplitude de 2.77°C.

### I.3 Les techniques intégrées au bâtiment

#### I.3.1 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est définie par la société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (ASHRAE) comme « l'introduction d'air extérieur dans un bâtiment sous l'effet de différentiels de pression produits naturellement »

La ventilation naturelle peut permettre d'évacuer considérablement la chaleur indésirable dans un local sans aucune consommation électrique. L'air se déplace grâce aux différences de pression qui existent entre les façades du bâtiment et grâce à la différence de masse volumique, elle peut se produire grâce à un tirage par cheminée verticale ou un tirage par ventilation transversale (Figure I.13).

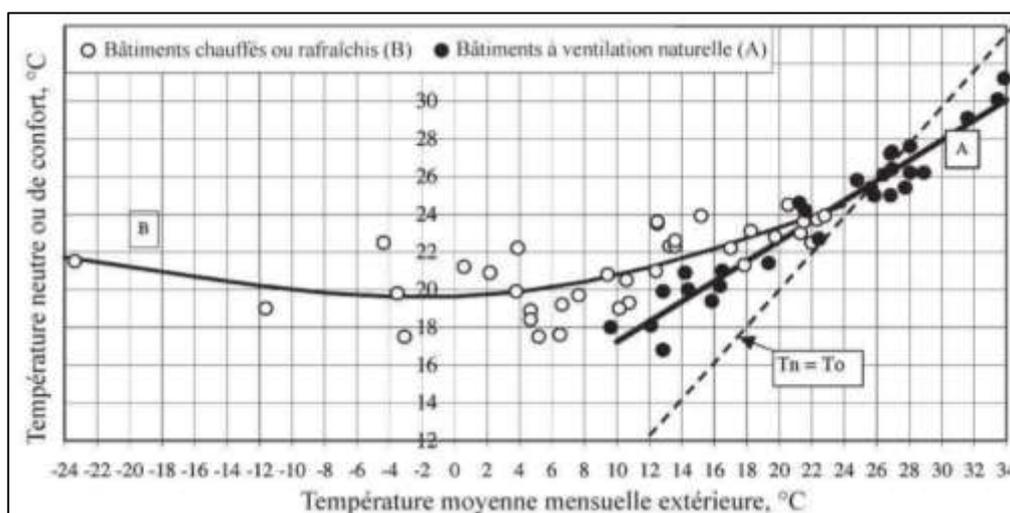


**Figure I.13.** Illustration de la ventilation naturelle par ventilation transversale et par cheminée verticale [35]

L'efficacité de la ventilation naturelle dépend des contraintes climatiques et des caractéristiques du bâtiment et doit être étudiée avec attention. Ainsi, pendant l'été, de nuit, l'air frais extérieur peut rafraîchir l'intérieur et se débarrasser de toute la chaleur accumulée tout au long de la journée.

Dans l'étude expérimentale de la ventilation naturelle menée par KHARCHI.R et al. [36] sur une maison économique à Soudania (à 20 km au sud-ouest d'Alger). Ils ont constaté que la ventilation naturelle améliore grandement le confort thermique et hygrométrique à l'intérieur de la maison. La température peut être maintenue autour de 26 °C et l'humidité relative fluctue entre 60 et 70%. Remon Lapisa [37] a constaté dans son étude sur le rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels que la ventilation naturelle a permis de réduire la moyenne des pics de température en période estivale entre 1.3 °C et 2.2 °C, selon la localisation du bâtiment. L'évacuation de chaleur par ce renouvellement d'air a été en mesure de diminuer l'inconfort d'été de 98.8 % en région méditerranéenne et de 58.2 % en région tropicale. En outre, il a montré que l'exploitation de l'inertie thermique de la dalle et de l'aménagement interne est essentielle pour l'efficacité de la ventilation naturelle.

Les modèles analytiques de définition du confort nécessitent la connaissance de plusieurs paramètres dont la mesure est complexe, et peut donc être faussée. Ils se basent sur un ensemble d'hypothèses qui conduisent à une définition du confort approximative. De nombreuses études (HUMPHREYS et FERGUS NICOL, 2002 ; MOUJALLED, 2007) ont montré que dans le cas de bâtiments naturellement ventilés, ces modèles n'arrivent pas à déterminer les situations de confort : dans la réalité les plages de confort sont plus étendues que celles prévues (Figure I.14) [38].



**Figure I.14.** Évolution de la température de confort en fonction de la température mensuelle moyenne pour les bâtiments climatisés et ceux à ventilation naturelle [38]

Selon l'étude de Khambadkone, [12] le potentiel de confort collectif pour l'été révèle que seulement 32 % du temps total est naturellement confortable pendant cette saison, ce qui indique un besoin élevé de refroidissement. La ventilation naturelle peut prolonger cette période de confort jusqu'à environ 60 à 62% du temps total pendant l'été et 60-80% du temps pendant les mois humides.

Une étude sur l'intérêt de la ventilation naturelle, comme stratégies de rafraîchissement passif, aussi bien pour l'environnement intérieur qu'extérieur a montré que la ventilation naturelle permet de réduire l'inconfort thermique d'été de 76.5 % [39].

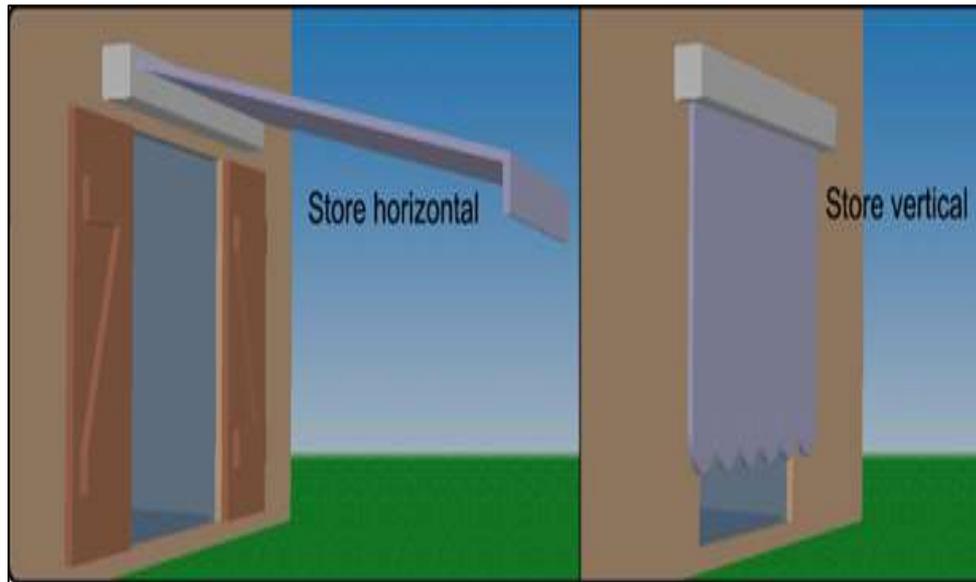
### I.3.2 Protections solaires et ombrages

Les bâtiments à façades largement vitrées sont souvent sujets à la réception d'intenses rayonnements solaires, qui peuvent être souhaitables en période de froid, mais conduisant à des risques d'éblouissement et de surchauffe, en période chaude.

Les dispositifs de protection solaire viennent au secours du confort thermique et visuel en réduisant les surchauffes et les risques d'éblouissement, notamment par affectation de la quantité du rayonnement incident, modification et contrôle des températures intérieures.

L'utilisation judicieuse de ces stratégies peut contribuer à améliorer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, à réduire les besoins énergétiques pour la climatisation, et à maximiser l'utilisation de la lumière naturelle, tout en tenant compte des conditions climatiques locales.

Le store est la protection solaire la plus utilisée. Mobile, il peut être vertical ou horizontal. L'avantage de ce procédé est qu'il peut s'adapter parfaitement à la position du soleil (Figure I.15).

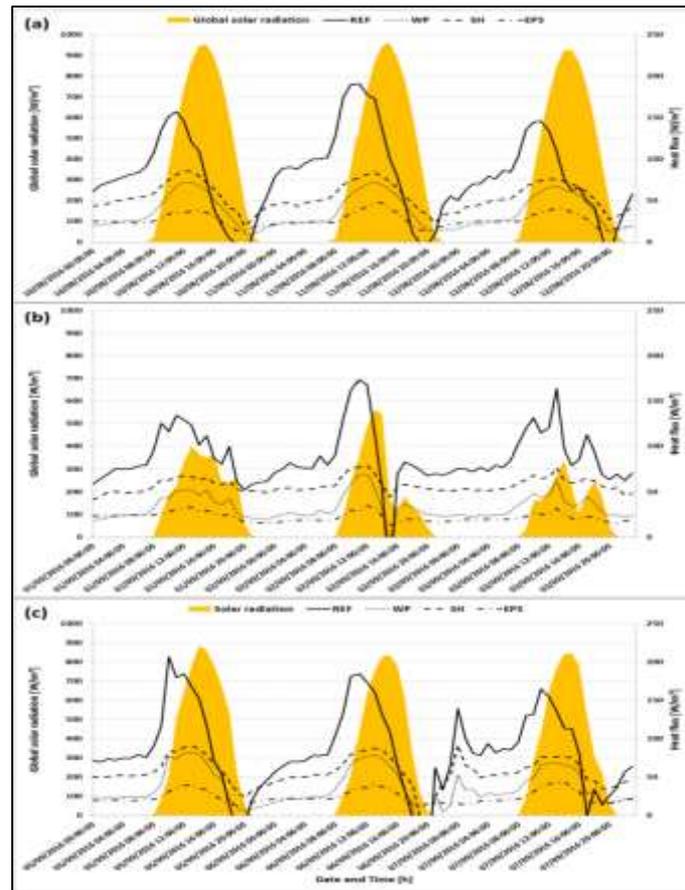


**Figure I.15.** Protection solaire horizontale et verticale [40]

Dans son étude, KACHKOUCH.S a évalué les performances thermiques de quelques techniques passives de protection thermique et solaire des toitures [32].

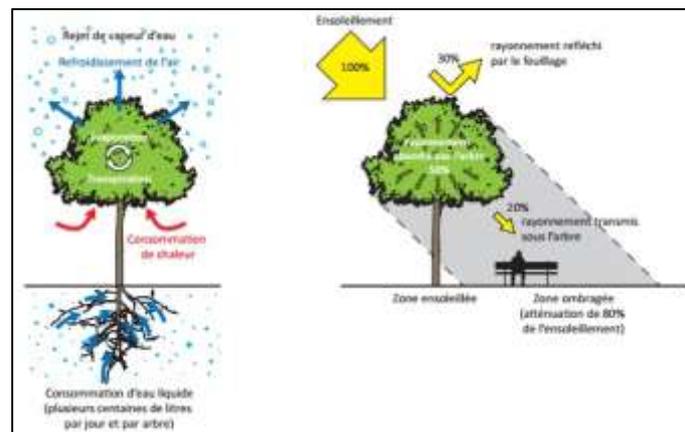
Ces techniques appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments ont été testées dans des conditions climatiques réelles de la ville de Marrakech. La technique de l'ombrage appliquée à la dalle de la cellule test, est constituée par une toile blanche étanche à l'eau placée à environ 13 cm au-dessus de la dalle. Elle garantit l'ombrage de la dalle toute la journée (matin, après-midi et soir).

La figure I.16 montre que la toile d'ombrage réduit de manière significative le flux thermique à travers la dalle par rapport à la cellule de référence et la température du plafond a été abaissée de 8,9°C par rapport à la cellule de référence.



**Figure I.16.** Flux de chaleur à travers la dalle des cellules test enregistrés pendant la période (a)-la plus ensoleillée (b)-nuageuse (c)-la plus chaude [32]

De même, les arbres permettent de créer un effet d’ombrage et de réfléchir une partie du rayonnement solaire par leur feuillage (Figure I.17).



**Figure I.17.** Processus physiques principaux à l’origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain [41]

La végétation extérieure absorbe une part d'énergie solaire dont 1 à 2% sont convertis en énergie chimique et évaporation de l'eau entraînant un rafraîchissement de l'air et une augmentation de l'humidité. La végétation peut réduire l'énergie nécessaire de climatisation de 15 à 35% [42].

Des simulations menées par Santamouris. M [43] ont mis en évidence la possibilité de diminuer les pics de température supérieurs à 1.3°C pendant l'été à Los Angeles en augmentant de 14% la couverture végétale extérieure.

### I.3.3 Végétalisation des parois du bâtiment

La végétalisation des murs, aussi connue sous le nom de « mur vert » ou « mur végétalisé » ou encore le « jardin vertical » sont des termes utilisés pour décrire toute forme de végétalisation verticale les murs végétalisés est une technique innovante qui consiste à couvrir les surfaces verticales des bâtiments de plantes et de fleurs. Cette approche offre de multiples avantages en termes de protection solaire, d'isolation thermique et d'amélioration de l'environnement urbain (Figure I.18).



Figure I.18. Mur végétal extérieur [44]

Il existe différentes techniques de végétalisation verticale (Figure I.19). Les différences structurales entre ces techniques de végétalisation engendrent des comportements thermo hydriques et aérauliques différents selon le type de façade utilisée.

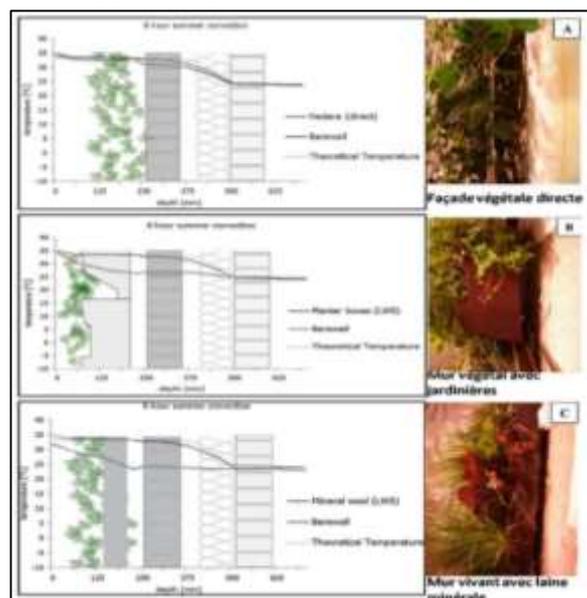


Figure I.19. Les systèmes de végétalisation verticale (a)-Façade verte directe (b)- Murs vivants à base de jardinières - (c) Murs vivants à base de laine minérale [45]

Les murs végétaux peuvent être utilisés afin de contrôler le gain de chaleur solaire dans les bâtiments. Cette technologie passive permet de réduire la température de la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment, réduisant ainsi la consommation d'énergie pour le refroidissement en été.

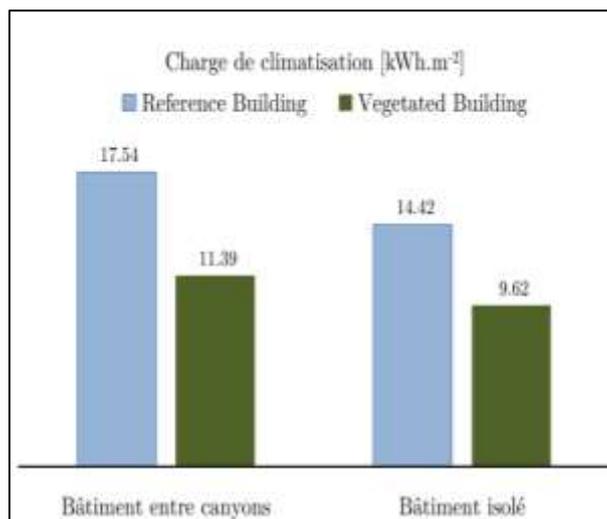
De plus, grâce à leur pouvoir isolant en hiver et rafraichissant en été, l'utilisation des murs végétaux et des toitures végétalisées ont des conséquences positives sur la performance énergétique des bâtiments. L'étude de Wang.B et al. [46] permet de conclure que la température maximale d'un mur végétal est de 30 °C alors que celle d'un mur classique atteint 60 °C, d'où la réduction de la consommation de climatisation.

Les façades végétales agissent comme des systèmes passifs pour diminuer les apports calorifiques des bâtiments via plusieurs processus. Tout d'abord, les plantes vont intercepter le rayonnement solaire et créer des zones d'ombres. Ensuite, la couverture végétale et le substrat vont constituer des couches isolantes supplémentaires. Lorsqu'une lame d'air est présente entre le mur et la couverture végétale, elle va générer un microclimat caractérisé par une température plus faible et un taux d'humidité relative plus élevé. Les plantes vont également diminuer la température de leur environnement proche en réalisant l'évapotranspiration durant laquelle elles vont convertir l'énergie captée en chaleur latente.

Stec.W et al [47] annoncent dans leur article que les plantes transforment environ 60% du rayonnement absorbé en chaleur latente. La capacité des façades végétales à diminuer la température de l'air ambiant permet d'endiguer l'effet îlot de chaleur [48]. En effet, la présence de zones végétalisées permet de créer des îlots de fraîcheurs en ville [49]. De plus, la couverture végétale va faire office de barrière contre le vent en réduisant sa vitesse ce qui va affecter la résistance thermique du bâtiment et par conséquent, son efficacité [45]. Elle va donc constituer un élément d'isolation supplémentaire et permet de réduire la consommation liée au chauffage en hiver.

Pour évaluer le niveau de chaleur des murs végétalisés, Perini.K et al. [45], ont développé un système expérimental qui permet de mesurer le gradient de température à travers des chambres climatiques. Ces auteurs ont constaté que les systèmes de végétalisation influencent positivement l'évolution de la température à travers la façade, ce qui permet d'améliorer la résistance thermique du bâtiment. Les résultats montrent des écarts de température entre le mur nu et les différents systèmes de murs verts analysés en été ; atteignant jusqu'à 1.7°C pour la façade végétale directe, 8.4°C pour le mur vivant avec jardinières et 5.8°C pour le mur vivant avec laine minérale. En hiver, les températures sont plus chaudes en raison de la présence de la végétation, ce qui signifie que la couche végétale ralentit la vitesse du flux thermique à travers la façade, améliorant ainsi sa résistance thermique.

Par ailleurs, la charge de climatisation des bâtiments végétalisés est moins élevée que celle des bâtiments de référence aussi bien pour le cas d'un bâtiment isolé que pour le cas des bâtiments avec des rues canyons (Figure I.20).



**Figure I.20.** Comparaison de la charge de climatisation dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence avec la charge obtenue pour les bâtiments isolés pour le mois de juillet et le climat d'Athènes [51]

La végétalisation est étendue aux toitures également, les toitures végétalisées offrent de nombreux avantages environnementaux et sociaux. En recouvrant les toits des bâtiments avec des substrats végétaux et des plantes vivantes, elles contribuent à réduire l'impact environnemental des zones urbaines tout en améliorant la qualité de vie des habitants. (Figure I.21).



**Figure I.21.** Toiture végétalisée [14]

Parmi les différents éléments de l'enveloppe du bâtiment, le toit est considéré comme le plus important lorsqu'il s'agit de développer des mesures passives. En effet, il s'agit de la partie la plus exposée d'un bâtiment au rayonnement solaire direct et il existe suffisamment de preuves indiquant que le toit seul peut être responsable d'environ 50 % de la charge thermique dans les bâtiments à un ou deux étages pendant l'été [51].

La température de surface des toits conventionnels peut atteindre des valeurs très élevées en été. Leur végétalisation peut réduire considérablement cette température en raison de leurs caractéristiques de composante verte, le flux de chaleur conduit à travers le toit est ainsi affecté, modifiant ainsi la demande énergétique du bâtiment et le niveau de confort thermique intérieur.

D'après W. YANG et al., les toits verts peuvent réduire le flux de radiation solaire à travers le toit jusqu'à 35% [52].

L'étude expérimentale du centre d'Écologie Urbain de Montréal a montré une diminution des gains de chaleur par la toiture du bâtiment variant de 86 % à 98 % grâce à l'ajout d'un toit vert de même qu'une réduction des pertes de chaleur pendant les périodes de chauffage allant de 16 % à 33%. Ces diminutions entraînent une réduction de la consommation énergétique du bâtiment.

Le modèle mathématique de Lazzarin et al. [53] démontre que dans le cas d'un bâtiment protégé par un toit vert, 98% de l'énergie solaire est détournée du bâtiment. L'expérience des toits verts du centre d'écologie urbain de Montréal montrent des résultats similaires avec une diminution de 86% pour le toit vert non irrigué et une diminution de 98% pour le toit vert irrigué.

### I.3.4 Cool-roof

Le toit reçoit le rayonnement solaire le plus fort du soleil pendant la plus longue période par rapport aux autres éléments du bâtiment.

Le concept de « Cool Roof » (toit frais) se réfère à l'utilisation de matériaux de toiture à haute réflectivité ou à haute émissivité thermique, souvent de couleur blanche ou très claire, pour réduire l'absorption de chaleur du soleil et maintenir des températures plus fraîches à l'intérieur des bâtiments. Les toits frais peuvent être constitués de matériaux spéciaux tels que des membranes réfléchissantes, des peintures réfléchissantes ou des revêtements réfléchissants appliqués sur des surfaces existantes.

Le « Cool Roof » qui consiste à placer sur le toit un revêtement ayant une faible absorptivité solaire (Figure I.22).

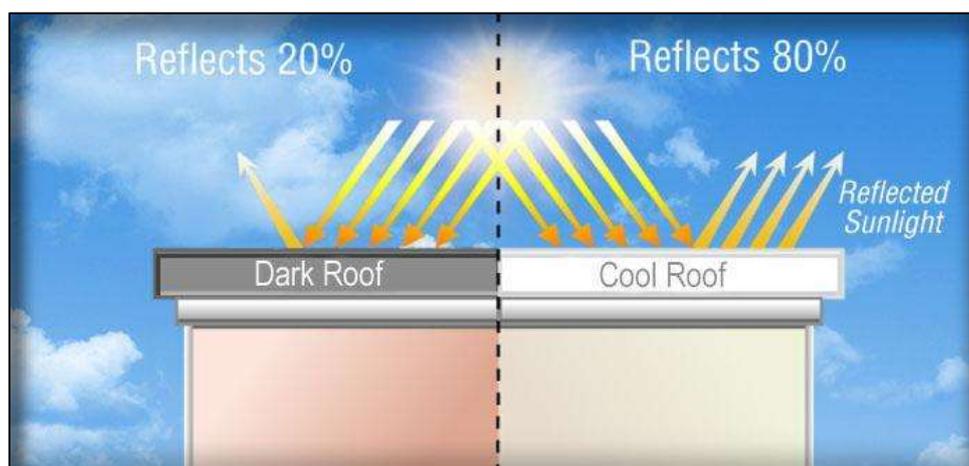


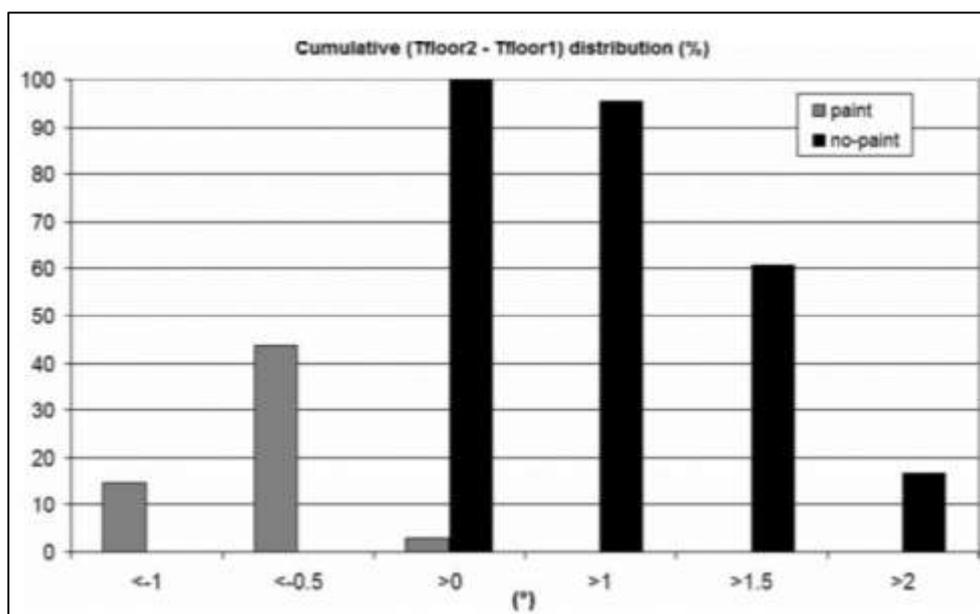
Figure I.22. L'effet du cool-roof [37]

Le « cool roof » est efficace pour réduire la charge thermique liée au flux solaire en été. La température de la toiture est réduite jusqu'à 23 °C pendant le pic de la chaleur et conduit à la réduction du nombre de degré heures d'inconfort d'été entre 21.2 % et 80 % selon les conditions climatiques [55].

D'après S. KACHKOUCH, la peinture blanche a permis de réduire les échanges thermiques avec l'extérieur par rapport à un toit nu. En effet, la température du plafond a été abaissée, par rapport à la cellule de référence de 13°C et la charge annuelle de refroidissement de 17% [32].

Des résultats expérimentaux de l'effet des Cool Roof sur l'amélioration du confort thermique interne dans les bâtiments résidentiels en Italie ont été rapportées [55]. Le toit a été recouvert d'une peinture avec une réflectance solaire mesurée de 85.9 % et des mesures ont été effectuées avant et après l'application de la peinture sur le toit.

La figure I.23, présente la différence de température de l'air entre l'étage 1 et l'étage 2, qui est le plancher sous le toit. On peut voir que la température de l'air dans l'espace sous le toit est plus basse qu'à l'étage 1 avec l'utilisation du cool roof.



**Figure I.23.** Répartition cumulée de la différence de température de l'air dans les salles d'essai avant et après le revêtement de la toiture [56]

### I.3.5 Bassin d'eau

Pendant la journée, la chaleur reçue du soleil est partiellement absorbée et stockée dans l'eau du bassin et partiellement évacuée par évaporation. Cette caractéristique d'absorption de chaleur de l'eau retarde l'apparition des pics de température intérieure.

D'après l'étude réalisée par Chtioui [57], un modèle de bassin de toit développé sur Python a été intégré au logiciel TRNSYS. Les résultats de la modélisation ont montré que le bassin d'eau a permis de réduire la valeur maximale de température de surface de toit de 50 à 58% selon les villes. Cette technique permettra de réduire le nombre de degrés heures d'inconfort d'été de 64% en climat de canicule future et de 59% pour les autres climats futurs.

La Figure I.24 présente les variations de température d'un bâtiment non climatisé à Paris en mi-saison et en été, pour le cas de référence (Top, Réf) et pour la solution de bassin de toit (Top, RPC), ainsi que la température de l'air extérieur. En été, le cas de référence, la température opérative (Top) dépasse

légèrement 40°C, contrairement à la semaine de mi-saison. Pour la solution RPC, la température opérative ( $T_{op}$ ) varie beaucoup plus légèrement pour les deux saisons. Par rapport au cas de référence, l'efficacité de la solution roof pond cool (RPC) est démontrée même en mi-saison avec une réduction maximale de température intérieure de 5.3°C, et de 8.6°C en été [57].

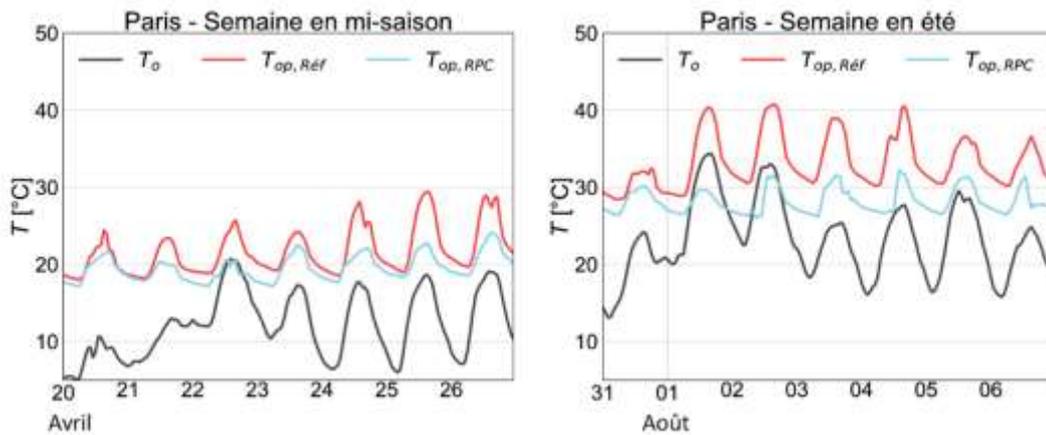


Figure 1.24. Évolution des températures de l'air extérieur et intérieur pour le bâtiment non climatisé [57]

### 1.3.6 Les puits canadiens

Un puits canadien est un dispositif géothermique de ventilation et de circulation de l'air qui permet de chauffer un habitat en hiver et de le rafraîchir en été. Il est également appelé puits provençal ou puits climatique. Ce système utilise l'énergie géo solaire, c'est l'énergie solaire absorbée et stockée dans les couches terrestres superficielles. Il s'agit d'une installation souterraine qui ne dépend pas du climat extérieur vu la stabilité de température sous terre. Le principe de fonctionnement du puits canadien est de faire circuler l'air extérieur à travers des conduits enterrés dans le sol, où la température est plus stable que celle de l'air extérieur (Figure 1.25).

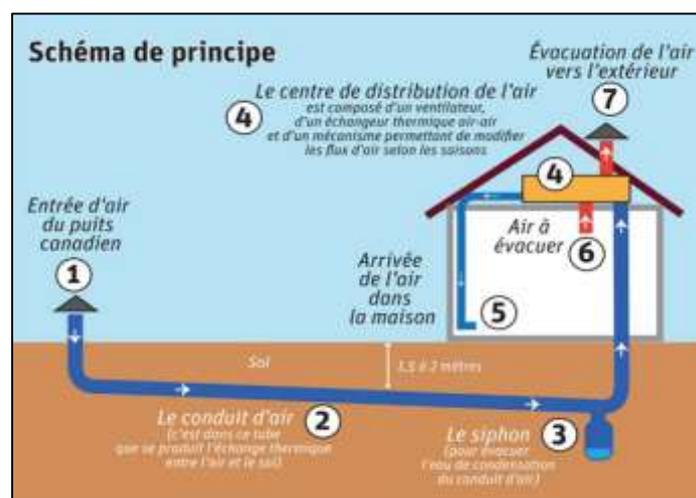


Figure 1.25. Fonctionnement d'un puits canadien [58]

Le puits canadien est considéré comme une source d'énergie renouvelable et écologique, il est connu pour son potentiel à augmenter le confort dans un bâtiment en utilisant le sol comme un réservoir d'énergie au lieu de l'atmosphère. Ce système utilise la température souterraine du sol qui reste relativement applicable pour amortir les températures de l'air extérieur à une profondeur d'environ 2 jusqu'à 5 m, que ce soit pour le chauffage comme pour le refroidissement.

L'étude de Lekhal.MC [59] a révélé que le puits canadien est une solution particulièrement efficace pour réduire les consommations énergétiques des bâtiments. En exploitant la température stable du sol, cette méthode permet de chauffer ou de rafraîchir l'air de manière significative, contribuant ainsi à une gestion énergétique plus optimisée.

Les travaux de thèse de KHABBAZ.M sur l'étude d'un échangeur de chaleur air-sol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air ont montré que quand la température extérieure dépasse 40 °C, la température à la sortie du tube enterré est quasi-constante et égale à de 22°C pour le débit 244 m<sup>3</sup>/h et 25°C pour le débit de 312m<sup>3</sup>/h, avec une humidité relative autour de 50 %. La réduction de température peut atteindre 19.8 °C et 16.3°C pour les deux débits respectifs [60].

### I.3.7 Les murs trombe

C'est un mur de couleur sombre placé à 10 cm derrière un vitrage faisant face au sud disposant d'orifice à passage d'air (figure I.26). Le principe de fonctionnement d'un mur trombe repose sur l'absorption, le stockage et la redistribution de la chaleur solaire à l'intérieur d'un bâtiment.

En exploitant le rayonnement solaire, il capte, stocke et redistribue la chaleur à l'intérieur des bâtiments pour fournir le chauffage de la pièce en hiver ou facilite la ventilation de la pièce en été. Ce concept simple mais puissant offre une alternative efficace aux systèmes de chauffage traditionnels, réduisant ainsi la consommation d'énergie et améliorant le confort thermique.

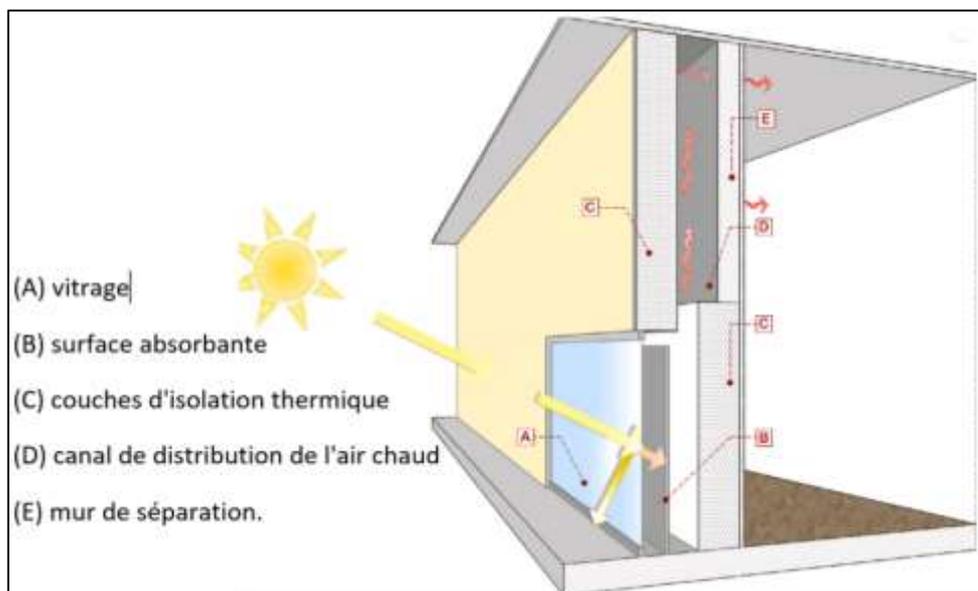


Figure I.26. Description des principaux composants du mur trombe [61]

Les murs Trombe, également connus sous le nom de murs de stockage et de murs de chauffage solaire, peuvent réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment jusqu'à 30% [62].

Les résultats de l'étude de l'analyse expérimentale d'une configuration innovante de mur Trombe, appelée mur Trombe à thermo-diode, qui a été spécialement conçue pour améliorer l'efficacité énergétique en fournissant un niveau d'isolation approprié pour l'enveloppe du bâtiment. Un modèle numérique d'un mur Trombe a été développé dans l'environnement TRNSYS et validé à l'aide d'un prototype expérimental à petite échelle, produisant une réduction de 77% de la demande d'énergie de chauffage pour un bâtiment tunisien simple de 16 m<sup>2</sup> non isolé. Dans un site méditerranéen, il a été constaté que le mur de Trombe ne réduisait pas la charge de chauffage maximale ; cependant, une économie annuelle d'énergie de chauffage allant jusqu'à 32.1 % peut être atteinte avec un rapport de surface de 37 % [63].

Un mur trombe a été conçu et testé pour le chauffage et le refroidissement passifs de bâtiments existants au Chili [6]. Les résultats ont montré des économies d'énergie prévues de 44.14 et 25.35 %, respectivement, pour deux villes situées dans des microclimats hivernaux différents.

Askari et Jahangir [65] ont étudié un mur Trombe avec deux couches de matériau à changement de phase avec des points de fusion différents pour la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment résidentiel à Téhéran (capitale de l'Iran). Ils ont montré que le mur classique Trombe avec un mur de stockage en béton de 15 cm d'épaisseur et une lame d'air de 20 cm, réduit la consommation d'énergie de 34 % en hiver.

L'intégration du mur Trombe avec un matériau à changement de phase permet une économie d'énergie maximale de 55% en hiver et de 36% en été [66].

D'après Pourghorban et Asoodeh [67] ont effectué une simulation numérique avec le logiciel EnergyPlus pour étudier les impacts des caractéristiques thermiques et dimensionnelles du mur de Trombe sur ses performances. Ils ont conclu que les propriétés structurelles du vitrage (liées aux couches et aux gaz utilisés) ont des effets maximaux sur la réduction de la période de surchauffe (jusqu'à 12.2 %) (Figure I.27).

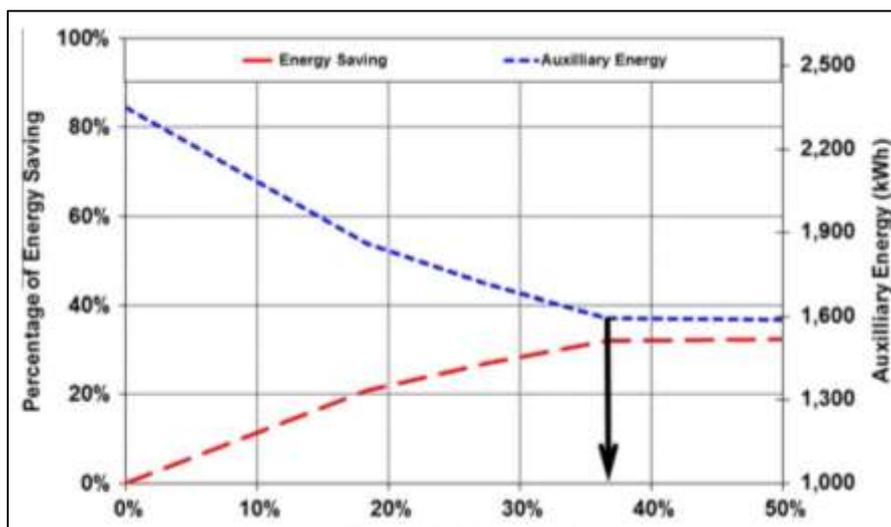


Figure I.27. Énergie auxiliaire annuelle due à la paroi de Trombe [68]

### 1.3.8 Plancher solaire direct

Le Plancher Solaire Direct, également connu sous le nom de PSD, est un système qui utilise l'énergie solaire pour fournir du chauffage au niveau du sol d'un bâtiment. Le fonctionnement du plancher solaire direct repose sur des tubes installés dans la dalle du plancher, qui sont remplis d'un fluide caloporteur. Ce fluide absorbe la chaleur solaire et la transporte vers un échangeur de chaleur situé dans le système de chauffage du bâtiment (Figure I.28). Là, la chaleur est utilisée pour chauffer l'air ou l'eau qui circule à basse température à travers le plancher, veillant à ce que la chaleur émise ne dépasse pas 27 à 28°C, fournissant ainsi de la chaleur aux pièces de la maison.

De plus, le plancher solaire direct peut contribuer à réduire les coûts de chauffage et les émissions de gaz à effet de serre en exploitant une source d'énergie propre et renouvelable.

Le dispositif accumule la chaleur pendant la journée et la restitue lentement la nuit pour chauffer le volume habitable couvrant de 30 à 70 % des besoins de chauffage [69].

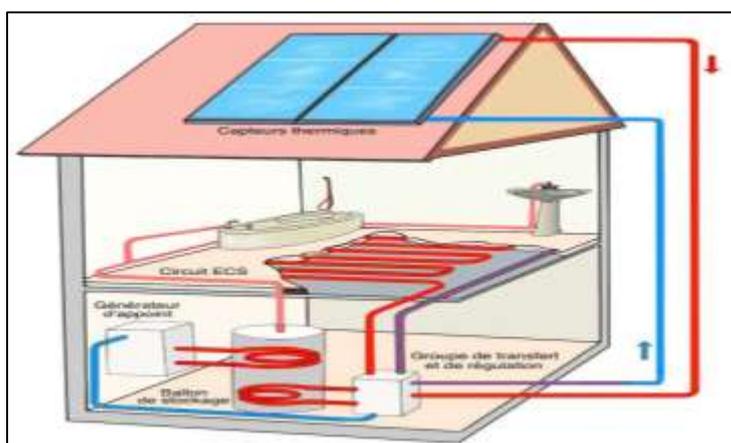


Figure I.28. Fonctionnement du plancher solaire [70]

Dans leur étude, Kazeoui. H et al. [70] ont examiné l'incorporation du plancher Solaire Direct (PSD) dans certaines constructions classiques, telles que les bâtiments traditionnels et modernes. Après avoir étudié le système et l'avoir appliqué à plusieurs cas d'études, les auteurs ont conclu que l'utilisation du PSD améliore considérablement les conditions de confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Environ 56% des PMV simulés varient de -0.5 à +0.5 (zone de confort où la température est d'environ 20°C) dans le bâtiment en adobe, contre 43% dans le bâtiment en doubles briques et seulement 27% dans celui en béton. De plus, le PSD réduit les zones froides et augmente les températures intérieures, surtout dans les bâtiments traditionnels.

En fonction de la localisation et des besoins énergétiques, les planchers chauffant permettent de couvrir de 45% à 100% des besoins en eau chaude solaire et de 20% à 70% des besoins en chauffage de l'habitat [11].

Afin d'étudier le potentiel des stratégies passives de refroidissement et de chauffage dans un climat indien composite, Khambadkone et al. [12] ont démontré que le potentiel de confort cumulé pour l'hiver indique que seulement 30 % environ du temps total est naturellement confortable pendant cette saison. Le chauffage solaire passif est utile pendant cette saison et peut prolonger cette période de confort jusqu'à environ 55%.

## **I.4 Conclusion**

En conclusion, les stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement offrent des solutions durables et efficaces pour optimiser le confort thermique des bâtiments tout en réduisant leur empreinte environnementale. En exploitant intelligemment les ressources naturelles telles que le soleil, le vent et l'ombre, ces approches permettent de minimiser la dépendance aux systèmes mécaniques conventionnels, contribuant ainsi à la conservation des ressources énergétiques et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, en intégrant ces stratégies dès la conception des bâtiments, il est possible de créer des environnements intérieurs agréables et sains tout au long de l'année, tout en réalisant des économies significatives sur les coûts d'exploitation à long terme. Ces stratégies constituent une approche durable pour un confort thermique optimal.

## Références bibliographiques

- [1] Bouloudem, W., & Smakdj, N. E. (2020). *Stratégies passives de la conception architecturale du bâtiment performant et confortable* (Thèse de doctorat).
- [2] [L'Asder agit pour la transition énergétique](#)
- [3] Benharra, H. (2016). *Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment. - Cas des zones arides et chaudes-* (Thèse de doctorat).
- [4] Huang, Y. et Niu, J. L. (2016). Conception optimale de l'enveloppe du bâtiment basée sur des performances simulées : historique, état actuel et nouveaux potentiels. *Énergie et bâtiments*, 117, 387-398.
- [5] Baglivo, C., Congedo, P. M., Di Cataldo, M., Coluccia, L. D., & D'Agostino, D. (2017). Envelope design optimization by thermal modelling of a building in a warm climate. *Energies*, 10(11), 1808.
- [6] Chen, X., Yang, H., & Zhang, W. (2018). Simulation-based approach to optimize passively designed buildings: A case study on a typical architectural form in hot and humid climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1712-1725.
- [7] Medjelekh, D. (2006). Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment cas de l'habitation de l'époque coloniale à guelma. *Mémoire magister. option: Architecture Bioclimatique. Université Mentouri de Constantine*.
- [8] LATRECHE, S. (2019). *Étude et amélioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra* (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra)
- [9] <https://www.ademe.fr/les-defis-de-la-transition/batiments/>
- [10] LABRECHE, S. (2014). *Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides* (Thèse de doctorat)
- [11] Florides, G. A., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A., & Wrobel, L. C. (2000). Modélisation des maisons modernes de Chypre et analyse de la consommation d'énergie. *Énergie*, 25(10), 915-937.
- [12] Khambadkone, N. K. et Jain, R. (2017). Un outil d'analyse bioclimatique pour étudier le potentiel des stratégies de refroidissement et de chauffage passifs dans un climat indien composite. *Bâtiment et environnement*, 123, 469-493.
- [13] Berghout, B. (2012). *Effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur cas de Biskra, Algérie* (Thèse de doctorat).
- [14] [Pinterest](#)
- [15] Aboubakr Seddik Hachani, N. E. I. M. Etude expérimentale d'un système de refroidissement par évaporation de l'eau.
- [16] [https://stringfixer.com/fr/Evaporative\\_cooling](https://stringfixer.com/fr/Evaporative_cooling)
- [17] Ishii, T., Tsujimoto, M., Yoon, G., & Okumiya, M. (2009, June). Cooling system with water mist sprayers for mitigation of heat-island. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan* (Vol. 29).
- [18] Brophy, V. et al., 2000. Sustainable urban design. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport.]
- [19] Nikolopoulou, M. (2004). Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain: une approche bioclimatique. *Center for Renewable Energy*.
- [20] RANE COMPANY. (1987). *Trane air conditioning manual*. The Trane Company.

- [21] Karim, L., Bontemps, A., Grados, A., & Royon, L. (2013, novembre). *Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère*. Communication présentée à la conférence à Marrakech, Maroc, pp. 1-5.
- [22] Kuznik, F., Virgone, J., & Johannes, K. (2010). Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings*, 42(7), 1004-1009.
- [23] Hessad, A. (2017). *Apport des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments* (Thèse de doctorat).
- [24] Tyagi, V. V., & Buddhi, D. P. C. M. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(6), 1146-1166.
- [25] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345
- [26] Saffari, M., de Gracia, A., Ushak, S., & Cabeza, L. F. (2017). Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1239-1255.
- [27] Al-Yasiri, Q., et Szabó, M. (2022). Enveloppe de bâtiment couplée à un matériau à changement de phase pour le confort thermique et l'économie d'énergie : Effet de la ventilation nocturne naturelle sous climat chaud. *Journal de la production plus propre*, 365, 132839.
- [28] DERRADJI, L., HAMID, A., AMARA, M., MAOUDJ, Y., & ERREBAI, F. B. Étude de l'influence des matériaux à changement de phase sur l'évolution de la température des cellules.
- [29] <https://bibliothèque.ademe.fr/ged/6488/guide-pratique-isoler-sa-maison.pdf>
- [30] Mohsen, M. S. et Akash, B. A. (2001). Quelques perspectives d'économies d'énergie dans les bâtiments. *Conversion et gestion de l'énergie*, 42(11), 1307-1315.
- [31] Guechhati, R., Moussaoui, M. A., Mezrhab, A., & Mezrhab, A. (2010). Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda. *Journal of Renewable Energies*, 13(2), 223-232.
- [32] Kachkouch, S. (2018). *Évaluation expérimentale et par simulation des performances thermiques de techniques passives appliquées aux toitures pour le rafraîchissement des bâtiments en climat chaud* (Thèse de doctorat).
- [33] Necib, H., Belakroum, R., & Belakroum, K. (2016). Amélioration de l'isolation thermique des habitats dans les régions chaudes et arides.
- [34] Medjelekh, D. (2010). Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure. *Journal of Renewable Energies*, 13(2), 265-273. :
- [35] L'habitat bioclimatique - ppt télécharger (slideplayer.fr)
- [36] Kharchi, R., & Imessad, K. (2018). Hygrothermal study of dwelling submitted to passive cooling. *Thermal Science*, 22(6 Part A), 2597-2604.
- [37] Lapisa, R. (2015). *Étude du rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels* (Thèse de doctorat).
- [38] Batier, C. (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen* (Thèse de doctorat).

- [39] Kaboré, M., Salagnac, P., Bozonnet, E., Abadie, M., & Perrin, R. (2017). Evaluation des solutions de rafraîchissement passif d'un bâtiment commercial et de son environnement proche: «Cool roof» et ventilation naturelle. In *Société Française de Thermique (SFT 2017)*.
- [40] [Fichier:Stores.png — Solarpedia](#)
- [41] <https://lion-environnement.org>
- [42] Bozonnet, E., Allard, F., Musy, M., Chazelas, M., & Guarracino, G. (2006). *URBAT: Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain: le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions* (Thèse de doctorat).
- [43] Santamouris, M. (2005). *Advances of solar energy*, chapitre Passive cooling of buildings.
- [44] [www.geoplastglobal.com](http://www.geoplastglobal.com)
- [45] Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L., Haas, E. M., and Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11) :2287–2294.
- [46] Wang, B., Cot, L. D., Adolphe, L., Geoffroy, S. et Morchain, J. (2015). Estimation de l'énergie éolienne sur le toit de deux bâtiments perpendiculaires. *Énergie et bâtiments*, 88, 57-67.
- [47] Stec, W. J., Van Paassen, A. H., and Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5) :419–427.
- [48] Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., and Khanmohammadi, M. A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181(April) :106923.
- [49] Fahed, J. (2018). Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Génie civil. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT : 2018ISAT0024. tel-02003346.
- [50] Djedjig, R. (2013). *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain* (Thèse de doctorat).
- [51] Sharifi, A. et Yamagata, Y. (2015). Les bassins de toit comme systèmes de chauffage et de refroidissement passifs : une revue systématique. *Énergie appliquée*, 160, 336-357.
- [52] Yang, W., Wang, Z. et Zhao, X. (2015). Étude expérimentale des effets d'isolation thermique et de refroidissement par évaporation d'un toit exposé réservé aux eaux peu profondes dans les conditions climatiques subtropicales. *Villes et société durables*, 14, 293-304.
- [53] Lazzarin, R. M., Castellotti, F. et Busato, F. (2005). Mesures expérimentales et modélisation numérique d'un toit vert. *Énergie et bâtiments*, 37(12), 1260-1267.
- [54] Nahar, N. M., Sharma, P., & Purohit, M. M. (1999). Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. *Energy Conversion and Management*, 40(1), 89-95.
- [55] Akbari, H., Pomerantz, M. et Taha, H. (2001). Refroidir les surfaces et ombrager les arbres pour réduire la consommation d'énergie et améliorer la qualité de l'air dans les zones urbaines. *Énergie solaire*, 70(3), 295-310.
- [56] Zinzi, M., & Fasano, G. (2009). Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas. *International Journal of Sustainable Energy*, 28(1-3), 123-139.
- [57] Chtioui, F. (2023). *Étude du rafraîchissement passif de bâtiment par l'intégration d'un système de rétention d'eau* (Thèse de doctorat).

[58] [Courrier-Service. Économie d'énergie : le puits canadien \(republicain-lorrain.fr\)](#)

[59] LEKHAL, M. C. (2018). Modélisation du comportement thermique d'un bâtiment équipé de système combiné, capteur solaire et puits canadien (Thèse de doctorat).

[60] Khabbaz, M. (2016). *Contribution à l'étude d'un échangeur de chaleur air-sol (puits canadien) pour le rafraîchissement de l'air sous le climat chaud et semi-aride de Marrakech* (Thèse de doctorat).

[61] Journal of building engineering 86 (2024)

[62] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(8), 6340-6351.

[63] Szyszka, J., Bevilacqua, P., & Bruno, R. (2020). An innovative trombe wall for winter use: The thermo-diode trombe wall. *Energies*, 13(9), 2188.

[64] Agurto, L., Allacker, K., Fissore, A., Agurto, C. et De Troyer, F. (2020). Conception et étude expérimentale d'un mur préfabriqué Trombe à faible coût pour améliorer la température intérieure des logements sociaux dans la région de Biobío au Chili. *Énergie solaire*, 198, 704-721.

[65] Gilvaei, Z. M., Poshtiri, A. H. et Akbarpoor, A. M. (2022). Un nouveau système passif pour assurer la ventilation naturelle et le refroidissement passif : évaluation du confort thermique et de l'énergie des bâtiments. *Énergie renouvelable*, 198, 463-483.

[66] Sady, H., Rashidi, S. et Rafee, R. (2024). Vers un bâtiment à consommation énergétique nette zéro avec un contrôle intelligent des murs Trombe, des conduits d'air souterrains et un microréseau optimal composé de systèmes d'énergie renouvelable. *Énergie*, 130703.

[67] Pourghorban, A. et Asoodeh, H. (2022). Les impacts des vitrages avancés sur les performances annuelles des systèmes muraux Trombe dans les climats froids. *Technologies et évaluations de l'énergie durable*, 51, 101983.

[68] Jaber, S., & Ajib, S. (2011). Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 85(9), 1891-1898.

[69] Abdmeziem, M. E. A. (2021). Etude et conception d'un système de chauffage hybride solaire-gaz d'une habitation de 120 m<sup>2</sup> pour les conditions climatiques de la région du wancharisse.

[70] Kazeoui, H., Tahakourt, A., Belarbi, R., & Ait-Mokhtar, A. (2015). *Impact du couplage matériaux locaux-chauffage solaire sur les performances énergétiques des bâtiments*.

**CHAPITRE II**  
**CONFORT THERMIQUE ET ÉNERGIE**

## II.1 Introduction

Le confort thermique revêt une importance cruciale dans le domaine du bâtiment, tant pour le confort des occupants que pour l'efficacité énergétique des structures. Afin de répondre à cette exigence, plusieurs modèles ont été élaborés pour estimer et optimiser les conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments. Ces modèles fournissent des outils essentiels pour concevoir des espaces habitables offrant un confort thermique optimal tout en réduisant la consommation énergétique.

## II.2 Notion de confort thermique dans le bâtiment

La notion du confort thermique est une notion très vaste et complexe du fait de son aspect subjectif. En raison de son importance, le concept de confort thermique a été traité dans différentes recherches et a été défini par différents chercheurs et experts au cours des dernières années. Ainsi, d'après Taleghani et al. [1], la notion du confort thermique a été discutée depuis les années 1930. D'après Fabbri [2], le concept de confort thermique est né au XXe siècle, lorsqu'il est devenu possible de contrôler directement le microclimat intérieur.

Généralement le terme confort signifie un sens de bien-être ou un état de satisfaction.

Conformément aux normes internationales (ISO7730 1994 ; ASHRAE55 1992) et aussi avec les travaux de Fanger, le confort thermique a été défini comme « Cette condition d'esprit qui exprime satisfaction avec l'environnement thermique » [3]. Dans ce même esprit, Liébard et De Herde ont défini le confort thermique comme « un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement » [4].

De son côté, Enescu voit qu'avec le développement réalisé progressivement au fil des années, la définition classique du confort thermique comme la condition de la satisfaction de l'environnement thermique est devenue inadaptée pour prendre en compte le niveau de confort dans des situations [5]. Une autre définition donnée dans la norme ASHRAE 55-2004 est « cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique et qui est évaluée par une évaluation subjective ». Cependant, ces définitions générales doivent être quantifiées afin de réaliser des analyses techniques dans différents types d'applications.

Selon Taleghani et al. [1], l'étude du confort thermique dans le bâtiment est très complexe, car elle intègre plusieurs sciences telles que la physiologie, la physique du bâtiment, le génie mécanique et la psychologie. Moujalled voit que « Le confort thermique n'est pas défini dans l'absolu. Il dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il peut être conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques » [6].

## II.3 Les paramètres influençant le confort thermique

Les critères de confort les plus couramment utilisés dans le design architectural sont basés sur les travaux de Fanger [7]. Ce dernier a développé une théorie selon laquelle le confort thermique dépend de six (6) paramètres (Figure II.1) :

- **Le métabolisme** : Il s'agit de la production de chaleur interne au corps humain Permettant de maintenir celui-ci autour de 36.7 °C. Lorsqu'une personne est en Mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos. Une unité appelée "met" a été créée pour Caractériser le métabolisme.

- **L'habillement** : Il représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement, tout comme l'isolation d'une maison crée une résistance thermique conservant la chaleur à l'intérieur
- **La température ambiante de l'air** : Elle représente la mesure de la chaleur ou de la fraîcheur de l'air dans un environnement spécifique. Cette température est influencée par divers facteurs tels que le chauffage, la climatisation, l'isolation, la présence de personnes ou d'appareils électriques, et les conditions météorologiques extérieures.
- **La température opérative (TOP)**: De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie (appelée aussi température résultante sèche ou température opérative) qui tient compte de la température des parois :  $Top = (Ta + Tp) / 2$ .
- **L'humidité relative de l'air (HR)**: c'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température  $Ta$  et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue à la même température lorsque l'air est saturé.
- **La vitesse de l'air** : Ce paramètre influence les échanges de chaleur par convection en pratique, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne devraient pas dépasser les 0.2 m/s [7]. En effet, l'individu commence à ressentir le mouvement de l'air à cette vitesse, et les concepteurs de systèmes de ventilation mécanique essaient donc de ne pas la dépasser. En ventilation hygiénique naturelle des logements, il est plus difficile de s'assurer des vitesses d'air, vu l'influence du vent et des températures sur les déplacements d'air [8].

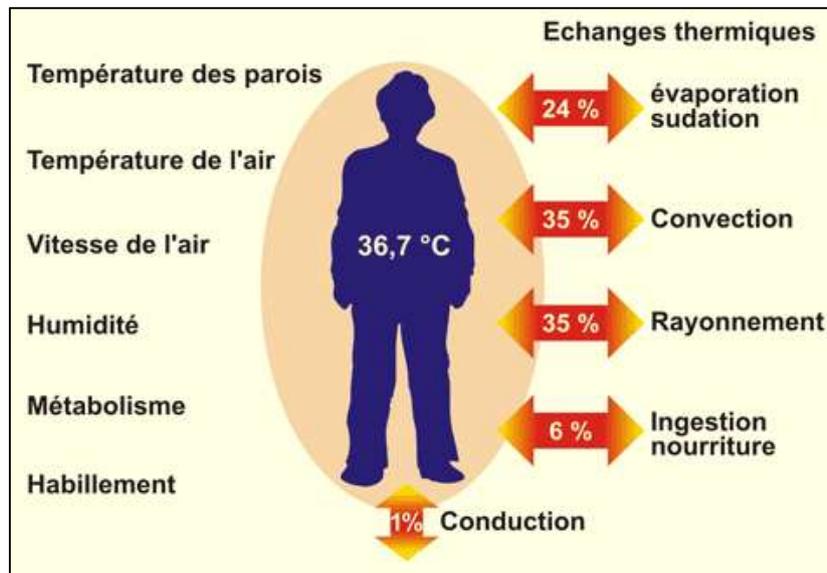


Figure II.1 Paramètres physiques influençant les pertes thermiques du corps humain [9]

#### II.4 Les critères nécessaires pour éviter l'inconfort dans un local

Pour éviter la sensation d'inconfort, la norme NBN X 10-005/ISO 7730 [10] propose les critères à respecter suivants :

- L'asymétrie de température de rayonnement de fenêtres (ou d'autres surfaces verticales) doit être inférieure à 10 °C (mesure à 0.6 m du sol). Cette mesure consiste donc à comparer comment la chaleur est échangée par rayonnement de chaque côté du corps vers l'environnement. Si le

déséquilibre dépasse 10 °C entre la température moyenne des parois vers la fenêtre et celle des parois vers le fond du local, la personne est en état d'inconfort.

- L'asymétrie de température de rayonnement d'un plafond chauffant doit être inférieure à 5 °C (mesure à 0.6 m du sol). Cela signifie que la différence de température de rayonnement entre différentes zones du plafond ne doit pas dépasser 5°C pour maintenir des conditions de confort thermique adéquates.
- La température de surface du sol doit normalement être comprise entre 19 et 26 °C, mais les systèmes de chauffage par le sol peuvent être conçus pour 29 °C par période de grand froid.
- La stratification verticale des températures doit être limitée à 3 °C entre 0.1 et 1.1 m au-dessus du sol. L'étude de l'orientation optimale du bâtiment avant leur édification peut aider ainsi la propriétaire à éviter/diminuer les différents inconforts cités ultérieurement [11].

## II.5 Mécanismes d'échanges thermiques

Les échanges thermiques sont des processus cruciaux dans divers contextes, permettant le transfert de chaleur entre différents milieux (Figure II.2). Comprendre ces mécanismes, notamment la conduction, la convection et le rayonnement, est essentiel pour de nombreuses applications, allant de la climatisation à l'ingénierie des matériaux.

### II.5.1 Conduction

La conduction est un mécanisme de transfert de chaleur par diffusion, ce type d'échange ne se produit que dans les objets solides. La chaleur s'écoule de l'élément le plus chaud vers le plus froid, jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

### II.5.2 Convection

La convection est un mécanisme de transmission de la chaleur par circulation d'un fluide, qui la conduit à un milieu plus froid. Elle est provoquée par une variation de température ou de pression. C'est un phénomène qui s'applique aux fluides ou aux interfaces solide-fluide.

### II.5.3 Rayonnement

Le rayonnement est un processus par lequel la chaleur est émise sous forme d'ondes électromagnétiques. Le rayonnement se produit plus efficacement, à travers un vide.

### II.5.4 Évaporation ou condensation

Le changement d'état liquide ou gazeux produit une absorption ou une émission de chaleur. Ces phénomènes qui ont lieu dans un bâtiment permettent le transfert de chaleur et impliquent par conséquent, un changement dans l'ambiance (M. BADECHE,2008) [12].

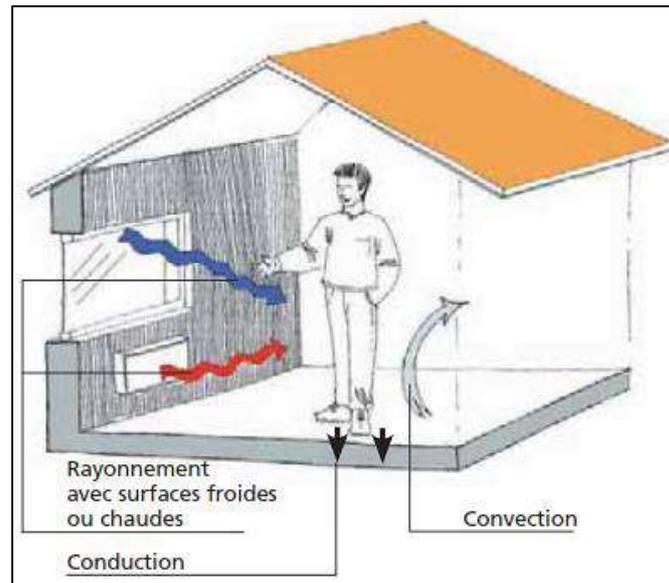


Figure II.2 Échanges des chaleurs liées à l'habillement d'un individu [11]

## II.6 Evaluation du confort thermique

L'évaluation du confort thermique dans les bâtiments vise à assurer des conditions intérieures idéales en termes de température, d'humidité et de circulation d'air. Cette démarche, guidée par des normes et des principes scientifiques, utilise des outils de simulation et des mesures pour optimiser les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. L'objectif est de créer des espaces habitables agréables et éco énergétiques, répondant aux besoins des occupants. Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer le confort thermique.

### II.6.1 Evaluation par les indices thermiques

Les indices thermiques sont des instruments pratiques pour décrire, élaborer et évaluer les environnements thermiques. Selon Berkouk [13], la littérature scientifique a utilisé divers indices thermiques pour évaluer le confort thermique. On peut citer la recherche de Hill, Barnard et Sequeira en 1897 [14.], qui reposait sur la théorie du transfert de chaleur, ainsi que la recherche de Winslow, Herrington et Gagge en 1937, qui utilisaient des indices de température opératifs [15]. De plus, l'étude de Fanger en 1970 [3], qui reposait sur l'indice de vote moyen prévisible (Predicted Mean Vote), ainsi que l'ISO 7730 [10], qui utilisait le pourcentage prévisible d'insatisfaits (Predicted Percentage of Dissatisfied) moyen et cumulatif.

Les indices de confort le plus couramment utilisés sont le PMV et le PPD. En effet, Fanger, en 1970, a développé ces deux indices : le vote moyen prévisible PMV (Predicted Mean Vote) qui prédit la sensation thermique moyenne d'un groupe d'individus et le Pourcentage Prévisible d'insatisfaits PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui prédit le pourcentage de personnes insatisfaites à l'environnement thermique.

### - Le vote moyen prévisible (PMV)

Le PMV permet de mesurer la sensation thermique d'un large groupe d'individus. D'après Mazari [16] "le PMV mesure la sensation thermique globale du corps à partir du métabolisme et donne la moyenne des votes en référence à une échelle". Les valeurs de PMV varient de -3 à 3 à l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE.

D'après Hall [17], la valeur numérique de PMV est calculée selon des équations développées à partir des mesures de stress thermique et le niveau d'activité. L'équation de calcul du PMV selon ISO 7730 est la suivante :

$$PMV = [0.303 * e^{-0.036M} + 0.028] * [(M - W) - 3.96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (T_{cl} - T_a) - 3.05 * [5.733 - 0.007 * (M - W) - p_a] - 0.42 * [(M - 5815)] - 0.0173 * M * (5.87 - p_a) - 0.0014 * M * (34 - T_a)].$$

Avec :

**M** : le taux métabolique en W/m<sup>2</sup>.

**W** : le travail externe en W/m<sup>2</sup> (souvent pris comme 0).

**f<sub>a</sub>** : le facteur de surface vestimentaire (rapport entre la surface de la peau couverte par les vêtements et la surface de la peau nue).

**T<sub>d</sub>** : la température de la surface des vêtements en °C.

**T<sub>r</sub>** : la température radiante moyenne en °C.

**T<sub>a</sub>** : la température de l'air en °C.

**h<sub>c</sub>** : le coefficient de transfert de chaleur par convection en W/m<sup>2</sup>·K.

**p<sub>a</sub>** : la pression partielle de vapeur d'eau en Pa.

Le PPD fournit des informations pratiques concernant le nombre de plaignants potentiels. Il est en relation direct avec le PMV. Il peut être calculé selon l'équation suivante :

$$PPD = 100 - 95 * e^{-0.03353*PMV^4 - 0.2179*PMV^2}$$

Le graphe de la figure II.3, représente la répartition et la variation de l'indice PPD en fonction du PMV. D'après le graph, il a remarqué que :

- Dans la situation optimale (PMV = 0, ni chaud ni froid), le taux d'insatisfaction est de 5% parmi des personnes connaissant les mêmes conditions thermiques, métaboliques et vestimentaires ;

- Le taux d'insatisfaction augmente de la même manière si le PMV s'écarte de 0 vers le froid et vers le chaud.

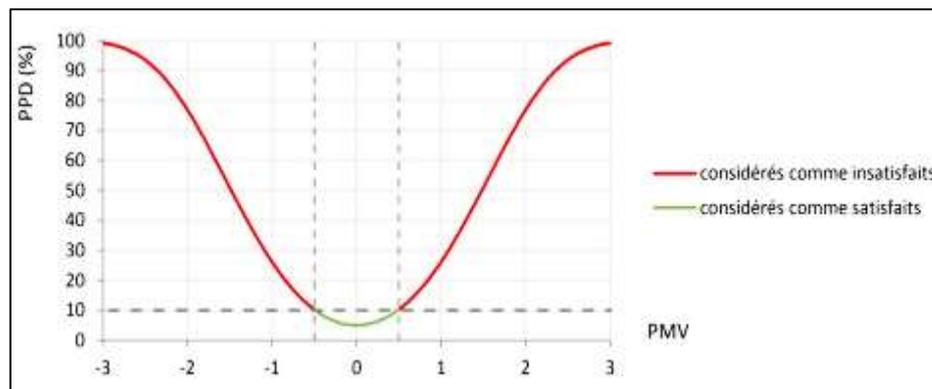


Figure II.3 Le pourcentage de PPD en fonction de la PMV [18].

Pour obtenir une situation de confort thermique, il est recommandé que le PPD soit inférieur à 10%, ce qui correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5 (Tableau II.1).

Tableau II.1. Catégories recommandées et PPD-PMV pour les bâtiments à conditionnement mécanique [19]

Catégorie	Etat thermique de l'ensemble du corps	
	PPD %	Moyenne prédite des votes
I	<6	-0.2<PMV<+0.2
II	<10	-0.5<PMV<+0.5
III	<15	-0.7<PMV<+0.7
IV	>15	PMV<-0.7 ; or PMV>+0.7

La plupart des normes et réglementations fixent une température de consigne pour le contrôle de la température intérieure de l'air. Par exemple, la réglementation thermique en France recommande que la température de consigne de la pièce soit de 19°C pendant la période de chauffage [20].

Cette mesure a été mise en place pour encourager une utilisation efficace de l'énergie et pour réduire les risques environnementaux résultant d'une consommation excessive d'énergie.

De nombreux groupes de recherche ont orienté leurs travaux vers le développement de stratégies de contrôle avancées pour les bâtiments, dans le but de maximiser les économies d'énergie avec un minimum de rénovation [21]. Deux approches principales basées sur le confort thermique ont émergé dans la littérature : une approche basée sur la détermination du PMV pour ajuster les variables de contrôle telles que la température et l'humidité relative, tandis que l'autre approche, moins fréquemment abordée, calcule le PMV inverse pour ajuster la température de consigne en fonction des préférences de l'utilisateur et des conditions environnementales internes [22]. Ces approches visent à maintenir un confort thermique cohérent à l'intérieur des bâtiments, au lieu de simplement maintenir une température de l'air statique [19].

## II.6.2 Les modèles environnementaux simples

Pour une évaluation simplifiée du confort thermique, plusieurs modèles se basent sur le calcul des indices suivants :

**Température effective ET\***: représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50% d'humidité relative et dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de calculer PMV\* qui tient compte d'un régime transitoire et de mieux interpréter les effets de l'humidité en ambiance chaude [23].

- **Température équivalente  $T_{eq}$** : est définie comme étant la température d'une enceinte isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de prendre en compte les effets des températures d'air, de rayonnement et de la vitesse d'air ( $t_a$ ,  $t_r$  et  $v_a$ ). Elle peut être calculée à partir de la température à l'intérieur d'un globe chauffé [6].
- **Températures opératives** : est une mesure qui intègre les effets de la température de l'air et de la température radiative des parois pour évaluer le confort thermique dans un espace intérieur.

## II.6.3 Evaluation par les outils graphiques

Diverses méthodes graphiques ont été créées afin d'évaluer le confort thermique et d'analyser l'influence des conditions climatiques sur les bâtiments. Ces outils graphiques sont des diagrammes bioclimatiques qui permettent de sélectionner les principales options architecturales en fonction des exigences de confort thermique et des profils climatiques extérieurs. Ces outils incluent le schéma bioclimatique d'Olgay, celui de Givoni, les tables de Mahoney et la méthode de Szokolay [24].

Afin d'évaluer les exigences physiologiques du confort, B. Givoni a présenté en 1963 des diagrammes basés sur le diagramme psychrométrique (Attia et Carlucci 2015). Ils utilisent les caractéristiques principales de l'humidité et de la température de l'air pour évaluer la sensation thermique et le confort des occupants (Castilla et al. 2014). Son objectif principal est de déterminer les conditions microclimatiques à l'intérieur des bâtiments qui permettent aux chercheurs d'évaluer les stratégies les plus adéquates pour maintenir le confort thermique dans différentes conditions climatiques, comme argumenté par Fernández (1994) et Castilla et al. (2014). Le graphique psychrométrique présenté à la figure II.4, est considéré comme la meilleure représentation des variables climatiques (Szokolay 1986). En 1992, Givoni a proposé deux séries de limites pour les pays développés et les pays en développement chauds, avec une élévation suggérée de 2 K (Givoni 1992 ; Attia et Carlucci, 2015). De ce fait, certaines zones du confort hivernal et estival sont superposées sur le diagramme psychrométrique commun. Les caractéristiques de ces zones peuvent être lues dans le tableau II.2 [13].

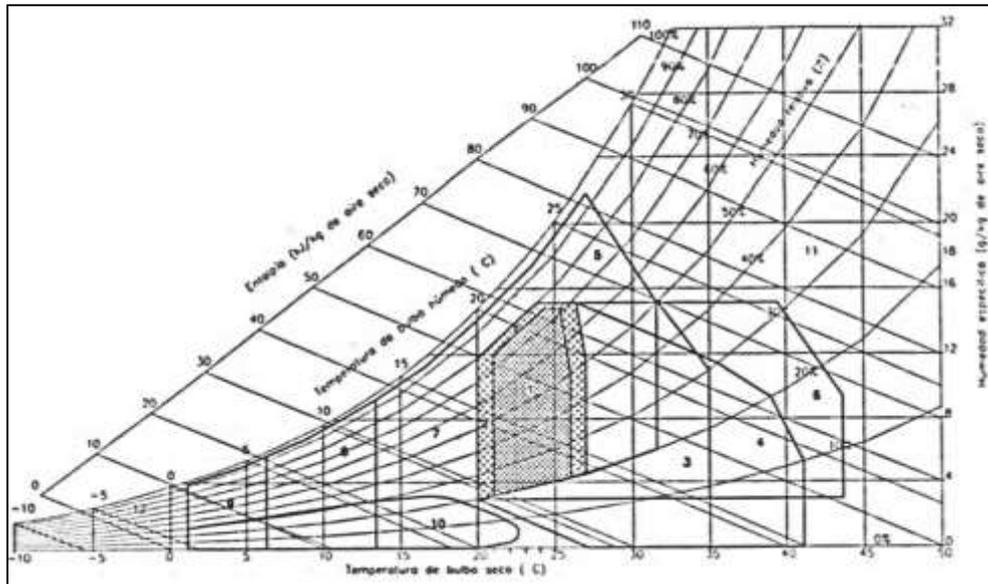


Figure II.4 Tableau psychrométrique adapté de Givoni [25]

Tableau II.2 Zones du confort intérieur du diagramme psychrométrique [13]

Paramètre	Période estivale	Période hivernale
Température de l'air intérieur (°C)	23-26	20-24
Humidité relative (%)	40-60	40-60

Les ingénieurs HVAC, les architectes et les chercheurs s'appuient sur des logiciels avancés pour utiliser les cartes psychrométriques et les indices PMV/PPD afin de garantir des environnements intérieurs confortables et adaptés aux besoins des occupants, parmi les logiciels les plus couramment utilisés, on trouve : **EnergyPlus** pour la simulation énergétique des bâtiments, **PsychroChart** pour l'analyse psychrométrique, **TRNSYS** pour la simulation dynamique des systèmes énergétiques et le comportement thermique des bâtiments, **Climate Consultant** pour l'analyse des données climatiques et l'évaluation des stratégies de conception bioclimatique.

## II.7 Les modèles approfondis

Le développement rapide de l'informatique pendant les dernières décennies a permis d'approfondir la recherche dans le domaine du confort thermique en créant et en affinant les modèles thermiques du corps humain. Il s'agit d'une simulation dynamique du comportement thermique et physiologique du corps humain dans une ambiance thermique donnée (bâtiment, voiture, scaphandre, etc.), transitoire et hétérogène, à travers un système d'équations différentielles. Les modèles thermiques comportent une description du système passif (le corps humain) qui est sujet aux différents échanges thermiques ayant lieu à l'intérieur du corps et avec l'ambiance, et du système actif de thermorégulation.

### II.7.1 La simulation thermique dynamique (STD)

La simulation thermique dynamique a émergé dans le domaine du bâtiment durant les années 1970-1980, en parallèle avec l'application des premières réglementations thermiques. L'intérêt de cette modélisation mathématique réside dans sa capacité à décrire l'évolution temporelle de l'état thermique d'une construction, permettant ainsi d'analyser les phénomènes thermiques complexes qui sont difficiles à appréhender de manière globale sur une année complète : tels que l'impact des apports gratuits, les effets de masquage ou de brise-soleil. Les logiciels de simulation actuels offrent une richesse de données bien plus importante que les premiers outils utilisés dans les années 1970, qui fonctionnaient généralement au pas de temps mensuel et ne prenaient pas en compte la dynamique des phénomènes. Cette évolution permet d'affiner considérablement la prévision du comportement des bâtiments et le dimensionnement des équipements.

#### Zoom sur les logiciels de STD actuels

Certains logiciels proposent une diversité d'outils et de fonctionnalités pour la modélisation et l'analyse thermique en génie civil, permettant aux ingénieurs d'évaluer la performance énergétique des bâtiments, de concevoir des systèmes efficaces et durables, et d'optimiser le confort thermique des occupants.

Voici quelques-uns des logiciels les plus fréquemment utilisés :

- **TRNSYS**

TRNSYS (Transient Systems Simulation Program) a été initialement développé par le Dr. Michael J. Witte et son équipe à l'Université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis. Les travaux ont débuté dans les années 1970, financés par la National Science Foundation (NSF) et le département de l'Énergie des États-Unis (DOE). Depuis, TRNSYS est devenu un logiciel de simulation énergétique largement adopté, et continue d'être amélioré et maintenu par le Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin, ainsi que par de nombreux contributeurs internationaux [26].

- **ENERGY PLUS**

EnergyPlus, financé par le département de l'Énergie des États-Unis, est un logiciel open source dédié à l'analyse de la performance énergétique des bâtiments. Il offre divers avantages, comme la capacité d'utiliser des intervalles de temps inférieurs à une heure et l'intégration de modules spécifiques pour l'introduction des équipements dans le bilan énergétique. De plus, il est compatible avec d'autres outils, tels que des modèles géométriques, ce qui en fait un outil polyvalent pour l'analyse énergétique des bâtiments [27].

- **HAP**

Le logiciel de conception HAP (Hourly Analysis Program) de la société Carrier se compose de deux modules : l'un dédié à l'estimation des charges et l'autre à l'analyse énergétique sur une base horaire. Les échanges de chaleur dans le bâtiment sont évalués selon la méthode des facteurs de transfert de l'ASHRAE. Le module d'analyse énergétique effectue une simulation des charges et du fonctionnement des équipements heure par heure pour une année entière [28].

- **DYMOLA**

Dymola, développé par Dassault Systèmes, est un environnement dédié à la Modélisation Dynamique, mettant l'accent sur la simulation de systèmes complexes. Basé sur le langage Modelica, il permet une modélisation pratique de systèmes dynamiques complexes et multiples, en s'appuyant sur des principes physiques. Initialement utilisé dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile, ce logiciel propose désormais des bibliothèques couvrant divers domaines tels que la mécanique, l'hydraulique, l'électricité, la robotique et la thermique du bâtiment. De plus, Dymola peut être intégré avec d'autres outils tels que EnergyPlus, Matlab ou GenOpt pour une utilisation combinée efficace [29].

## II.8 Les normes et réglementations du confort thermique

Le confort thermique à l'intérieur de bâtiment a été l'objet de débats, des valeurs limites ou indicatives suggérées pour les bâtiments ont été proposées par un certain nombre d'institutions professionnelles et dans la législation au cours des années. D'après Hall (2010) [17], il y a un intérêt national et international croissant pour la fourniture d'orientations pour assurer la protection et bonnes pratiques particulièrement dans les zones avec des conditions climatiques extrêmes.

### II.8.1 La norme ISO

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) la fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation a développé plusieurs normes pour établir des méthodes de mesure, des critères de performance et des lignes directrices pour l'évaluation de l'efficacité énergétique et du confort thermique des bâtiments [10]. L'ISO a présenté plusieurs normes au cours des années on peut citer :

*-ISO 7243, Ergonomie des Ambiances chaudes : Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail.*

*-ISO 7726, Ergonomie des ambiances thermiques : Appareils de mesure des grandeurs physiques.*

*-ISO 7933, Ergonomie des ambiances thermiques : Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible.*

*-ISO 8996, Ergonomie de l'environnement thermique : Détermination du métabolisme énergétique.*

*-ISO 7730 Ergonomie de l'environnement physique et les ambiances thermiques.*

*-ISO 7730 :1994, qui a fait l'objet d'une révision technique. Une méthode d'évaluation à long terme a été ajoutée, ainsi que des informations sur les inconforts thermiques locaux, sur les ambiances thermiques variables et sur l'adaptation. Une annexe informative, indiquant comment les exigences de confort thermique peuvent être exprimées dans différentes catégories, a également été ajoutée.*

*-ISO 7730 :2005, fournit une méthode analytique pour évaluer environnements et est basé sur le modèle de Fanger le vote moyen prévu et le pourcentage prévu d'indice d'insatisfaction (PMV / PPD) et sur les critères d'inconfort thermique local.*

### II.8.2 Les normes d'ASHRAE

D'après Meg Jenkins [30], la série ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) contient plusieurs documents relatifs à d'autres applications HVAC (Heating, Ventilation and Air conditioning). En effet, ASHRAE 15 qui couvre les normes de sécurité pour les

systèmes de réfrigération, ce standard spécifie les normes pour garantir une construction, une installation et une exploitation sécurisées des systèmes de réfrigération, englobant une variété d'équipements de réfrigération mécanique et à absorption, et l'ASHRAE 55 qu'est une norme de l'évaluation de l'environnement thermique à l'intérieur des bâtiments. Elle a été publiée pour la première fois en 1966 et est mise à jour tous les 3 à 7 ans sur la base des recherches actuelles, de l'expérience pratique et des recommandations des concepteurs, des fabricants et des utilisateurs finaux. Les versions les plus notables, ainsi que les plus récentes de la norme, sont les versions mises à jour de 2004 jusqu'à 2023) [31].

**ASHRAE 55-2004** : a introduit l'adoption de la méthode du modèle informatique, l'introduction de la méthode adaptative basée sur la recherche qui soutient les conceptions de ventilation naturelle, l'objectif de cette norme est de spécifier les combinaisons de facteurs environnementaux thermiques intérieurs et de facteurs personnels qui produiront des conditions environnementales thermiques acceptables pour la majorité des occupants dans l'espace.

**ASHRAE 55-2010** : a réintroduit la température effective standard "Standard Effective Temperature" (SET). La SET représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêtue standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Le SET est un indice de confort thermique intégrant l'effet des six paramètres de base, et applicable dans des conditions transitoires chaudes, modérées ou froides. Les sensations thermiques peuvent être déduites des différentes valeurs de SET à partir du Tableau ci-après [32] (Tableau II.3).

**Tableau II.3.** La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique [32]

SET (°C)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
>37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
34.5-37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.0-34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6-30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22.2-25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5-22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5-17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0-14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

**ASHRAE 55-2013** : spécifie les combinaisons de facteurs environnementaux intérieurs et de facteurs personnels qui produiront des conditions environnementales thermiques acceptables pour une majorité des occupants dans un espace donné. Les points clés concernant la norme ASHRAE 55-2013 sont les suivants :

- Elle fournit des critères pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments existants, ainsi que des exigences et des procédures de calcul pour la conformité de la conception.

- Les facteurs environnementaux (température, rayonnement thermique, humidité et vitesse de l'air) et les facteurs personnels (activité et habillement) se combinent de manière complexe pour créer des conditions thermiques intérieures.

**ASHRAE 55-2017** : la version 2017 a apporté des améliorations significatives en termes de méthodes d'évaluation, d'applicabilité élargie, de simplification des calculs et de clarification des exigences de documentation par rapport à la version 2013.

- Remplacement de la méthode graphique par des exemples graphiques normatifs de conditions spécifiques utilisant la méthode analytique.
- Ajout d'une nouvelle méthode d'évaluation de l'inconfort thermique local dû aux gradients verticaux de température entre le niveau de la tête et des chevilles.
- Consolidation et simplification des méthodes de calcul dans la norme, qui se limitent maintenant à deux méthodes standard et adaptative et un nouvel organigramme qui fournit des conseils sur le moment où il faut les utiliser.

**ASHRAE 55-2020** : Mise à jour par rapport à 2017 : La version 2020 a notamment introduit une méthode d'évaluation d'inconfort thermique local, une applicabilité élargie aux taux métaboliques jusqu'à 4 met, et une simplification des méthodes de calcul.

*Complémentarité avec d'autres normes* : La norme ASHRAE 55-2020 ne traite pas des aspects non thermiques de l'environnement intérieur et ne remplace pas les exigences de sécurité, de santé ou de processus critiques.

**ASHRAE 55-2023** : est utilisée pour garantir le confort thermique en considérant six facteurs essentiels (le taux métabolique, l'isolation des vêtements, la température de l'air, la température radiante, la vitesse de l'air et l'humidité). Pour assurer des conditions thermiques acceptables, tous ces critères doivent être appliqués ensemble. Cette norme s'applique aux adultes en bonne santé dans des espaces intérieurs conçus pour l'occupation humaine, jusqu'à 3000 m d'altitude, pour des périodes d'au moins 15 minutes. Elle propose des méthodes pour évaluer d'autres conditions thermiques et garantir un niveau de confort acceptable. Cependant, la norme ne traite pas des aspects non thermiques de l'environnement intérieur ni ne remplace les exigences de sécurité, de santé ou de processus critiques.

### II.8.3 Les normes et réglementations en Algérie

D'après le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (2011) comme cité dans Imessad et al. [33] le gouvernement algérien a imposé une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques à travers la loi N°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie et le décret exécutif N°2000- 90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs. La régulation thermique actuellement utilisée en Algérie est le [DTR C3.2 / 4], les vérifications de conformité de la saison d'hiver et d'été à l'aide de cette régulation doivent se faire séparément [4].

## II.9 La situation énergétique en Algérie

Selon le bilan énergétique national 2022, la consommation d'énergie finale s'est établie à 53.1 M Tep en 2022, contre 50.2 M Tep en 2021, soit une évolution de 5.9% à la faveur de la hausse de la consommation de pratiquement l'ensemble des produits énergétiques, essentiellement le gaz naturel et l'électricité [34].

### II.9.1 La consommation énergétique par type d'énergie

L'évolution de la consommation finale, par produit, est détaillée dans le tableau II. 4 :

**Tableau II.4. Consommation finale par produit [34]**

Produit	Unités	2021	2022	Evolution	
				Quantité	(%)
<b>Produits pétroliers</b>	K Tep	13 686	13 999	312	2.3
	K Tonnes	13 099	13 402		
<b>Gaz naturel</b>	K Tep	17 930	19 421	1491	8.3
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	18 974	20 552		
<b>Electricité</b>	K Tep	15 348	16 219	871	5.7
	GWh	63 442	67 207		
<b>GPL</b>	K Tep	3 157	3 422	266	8.4
	K Tonnes	2 675	2 900		
<b>Coke sidérurgique</b>	K Tep	47	27	-20	-42.4
	K Tec	68	39		
<b>Autres: -Bois</b>	K Tep	2	18	15	612.8
	K Tec	13	91		
<b>TOTAL</b>	K Tep	50 171	53 106	2935	5.9

### II.9.2 Consommation énergétique par secteur d'activité

Le détail de la consommation finale par secteur d'activité de 2022, est donné ci-après (Tableau II.5).

**Tableau II.5. Consommation finale par secteur [34]**

Unités : K Tep	2021	2022	Evolution	
			Quantité	(%)
<b>Industrie et BTP, dont :</b>	12 220	12 596	375	3.1
<b>Matériaux de construction</b>	4 887	5 113	226	4.6
<b>ISMME</b>	2 586	2 842	256	9.9
<b>BTP</b>	619	620	1	0.2
<b>Industries Manufacturières</b>	1 321	1 357	36	2.7
<b>Dont : industries Agroalimentaires</b>	1 185	1 213	28	2.4
<b>Chimie</b>	851	709	-142	-16.7
<b>Autres industries</b>	1 956	1 955	-2	-0.1
<b>Transport, dont :</b>	14 520	15 297	777	5.4
<b>Routier</b>	13 764	14 313	549	4.0
<b>Aérien</b>	246	262	16	6.4
<b>Ménages et autres, dont :</b>	23 431	25 214	1 783	7.6
<b>Résidentiel</b>	18 053	19 219	1 166	6.5
<b>Agriculture</b>	672	799	128	19.0
<b>Tertiaires</b>	4 706	5 195	489	10.4
<b>Total</b>	50 171	53 106	2 935	5.9

On remarque une hausse de la demande du secteur des "Ménages et autres" de 7.6% passant de 23.4 MTep en 2021 à 25.2 M Tep en 2022, tirée principalement par le sous-secteur résidentiel qui a

augmenté de 6.5%. Cette augmentation est la plus importante comparée aux autres secteurs d'activités.

## II.10 Principaux consommateurs d'énergies : les bâtiments

Les bâtiments sont de gros consommateurs d'énergie, cette consommation peut varier selon le type, la taille et la fonction principale de l'espace, et aussi selon les conditions climatiques extérieures.

Le secteur du bâtiment est considéré comme le premier consommateur d'énergie dans le monde, car il présente en lui seul autour de 35 % de la consommation d'énergie finale devant l'industrie et le transport qui consomment respectivement 31 % et 30 % [35].

La consommation d'électricité en Algérie est particulièrement plus élevée en été qu'en hiver pour plusieurs raisons. Tout d'abord, selon les statistiques de 2019, 46% de la consommation d'électricité provient du secteur domestique (logements et dépendances), 11% des collectivités locales, et 9% du secteur du commerce et des services divers. Cela signifie que 66% de la consommation totale se situe dans des domaines très énergivores en matière de climatisation. Ensuite, le modèle de consommation énergétique actuel en Algérie repose sur une forte utilisation du gaz naturel en hiver pour le chauffage et une consommation élevée d'électricité en été pour la climatisation [36]. La consommation des ménages, des tertiaires (bâtiments administratifs, hôpitaux, hôtels et écoles) et du secteur agricole représente 66% de la consommation nationale de gaz naturel [37].

### *Emissions de gaz à effet de serre*

Selon H. KAZEoui et al, le secteur résidentiel représente 36% des émissions totales de gaz à effet de serre. L'industrie des matériaux de construction est en tête en termes d'émissions, représentant 63% des émissions totales [38]. En 2022, les émissions de CO<sub>2</sub> en Algérie ont légèrement diminué de 0.96% par rapport à 2021, atteignant 177.079 millions de tonnes. Le pays se classe 153e sur 184 pays en termes d'émissions totales de CO<sub>2</sub>. De plus les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant ont également baissé, passant à 3.97 tonnes par habitant. L'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7% d'ici 2030, en utilisant ses propres moyens pour atteindre cet objectif [39].

## II.11 Conclusion

L'évaluation du confort thermique dans les bâtiments est essentielle pour assurer le bien-être des occupants tout en optimisant la consommation d'énergie. Deux approches principales sont utilisées à cet effet : les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques, comme le diagramme psychrométrique, permettent une analyse graphique des propriétés de l'air humide et des conditions de confort. Simples d'utilisation, elles identifient rapidement les stratégies passives adaptées au climat local. Cependant, elles peuvent manquer de précision et ne prennent pas toujours en compte tous les facteurs influençant le confort.

Les méthodes numériques, basées sur des simulations dynamiques, offrent une évaluation plus détaillée et précise du confort thermique. Elles modélisent finement les transferts de chaleur et de masse dans le bâtiment, en intégrant les effets des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation.

Néanmoins, ces méthodes nécessitent des compétences spécifiques et des moyens de calcul importants.

L'analyse des résultats met en évidence le caractère énergivore de nombreux bâtiments, en particulier pour les postes de chauffage et de climatisation. Cela souligne la nécessité d'intervenir pour réduire la consommation d'énergie et l'impact environnemental des bâtiments.

Dans ce contexte, l'utilisation de stratégies de conception passive, telles que l'optimisation de l'orientation et de l'enveloppe du bâtiment, la gestion des apports solaires, ou encore l'utilisation de la masse thermique, apparaît comme une solution pertinente et durable. Ces stratégies, identifiées grâce au diagramme psychrométrique, permettent de maintenir des conditions de confort tout en réduisant significativement les besoins en chauffage et climatisation.

## Références bibliographiques

- [1] Taleghani, M., Tenpierik, M., Van Den Dobbelen, A., & De Dear, R. (2013). Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 67, 166-175.
- [2] Fabbri, K. (2015). Indoor thermal comfort perception. A Questionnaire Approach Focusing on Children; Springer: New York City, NY, USA. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1>
- [3] Fanger, P.O. (1973) Thermal Comfort. McGraw-Hill Book Company, New York, 224 p
- [4] MANSOURI, K. (2023). *Optimisation du confort thermique et de l'efficacité énergétique dans les établissements scolaires: cas d'un climat chaud et aride* (Thèse de doctorat).
- [5] Enescu, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1353-1379.
- [6] Moujalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. *Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France*.
- [7] Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*, 30(4), 313-324.
- [8] FECIH, M. (2021). L'effet de l'ombre sur le confort thermique Centre d'art et de culture.
- [9] <https://www.inex.fr/ingenierie-thermique-et-environnementale/expertise-environnementale/confort-et-sante/confort-et-sante/>
- [10] [ISO - International Organization for Standardization](#)
- [11] Riantsoa, D. R. (2020). *ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉ: DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE* (Thèse de doctorat).
- [12] KECHROUD, K. (2023). L'impact de la végétation et les plans d'eau sur l'optimisation du confort thermique dans les équipements écotouristiques.
- [13] BERKOUK, D. (2017). Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif : Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra.
- [14] HILL, L. BARNARD, H. SEQUEIRA, J. (1897). THE EFFECT OF VENOUS PRESSURE ON THE PULSE.
- [15] Winslow, A. Herrington, L. Gagge, A. (1937), THE RELATIVE INFLUENCE OF RADIATION AND CONVECTION UPON VASOMOTOR TEMPERATURE REGULATION.
- [16] Mazari, M. (2012). *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public: cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)* (Thèse de doctorat).
- [17] Hall, M.R. (2010). Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings (1ère éd.). New Delhi : Woodhead Publishing
- [18] Batier, C. (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen* (Thèse de doctorat).
- [19] Hawila, A. A. W. (2019). *Integrating occupants' thermal comfort in the design of energy-efficient buildings* (Thèse de doctorat).

- [20] MEDDE, Réglementation thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs, 2011
- [21] Široký, J., Oldewurtel, F., Cigler, J., & Prívvara, S. (2011). Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied energy*, 88(9), 3079-3087.
- [22] Kang, D. H., Mo, P. H., Choi, D. H., Song, S. Y., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2010). Effect of MRT variation on the energy consumption in a PMV-controlled office. *Building and Environment*, 45(9), 1914-1922.
- [23] Le confort thermique dans le bâtiment. Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie IEPF
- [24] Szokolay, S. V (1986) 'Climate analysis based on the psychrometric chart', International journal of ambient energy. Taylor & Francis, 7(4), pp. 171–182
- [25] Olissan, A., Kouchade, C., Andre, P., & Awanou, C. N. (2012). Le confort thermique des bâtiments en région tropicale: cas de quelques bureaux du rectorat de l'université d'Abomey Calavi (Cotonou-Bénin). In *CIFEM 2012*.
- [26] [Trnsys18 | Transsolaire](#)
- [27] [EnergyPlus](#)
- [28] [Programme d'analyse horaire | Transporteur Transporteur Commercial Amérique du Nord \(carrier.com\)](#)
- [29] [Dymola | CATIA - Dassault Systèmes \(3ds.com\)](#)
- [30] [Thermal Comfort Basics: What is ASHRAE 55? | SimScale Blog](#)
- [31] [Home | ashrae.org](#)
- [32] Parsons, K. (2003). *Human thermal environment* (2nd ed.). London: Taylor & Francis.
- [33] Imessad et al. 2015, Etude expérimentale d'un système solaire combiné pour le chauffage par plancher.
- [34] Bilan énergétique national 2021. Algérie, 2022
- [35] IEA, 2012. World energy outlook 2012. Disponible à l'adresse : <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/> .
- [36] Messaoud Fakhreddine. 2022, Consommation électrique : La Sonelgaz annonce un nouveau pic record de la consommation d'électricité.
- [37] Bilan énergétique national du ministère de l'Energie et des Mines
- [38] Kazeoui H et al, article,2023, Study of the performance of passive cooling strategies in buildings under arid weather conditions.
- [39] [Algérie - Émissions de CO2 2022 | countryeconomy.com](#)

**CHAPITRE III**  
**ANALYSE BIOCLIMATIQUE**

### III.1 Introduction

L'objectif de l'analyse bioclimatique est de comprendre les caractéristiques climatiques spécifiques à une région donnée afin de concevoir des bâtiments qui tirent parti des conditions naturelles pour optimiser le confort des occupants tout en minimisant la consommation d'énergie. En examinant les paramètres tels que la température et l'humidité. Cette analyse vise à identifier les stratégies de conception passives les plus efficaces pour répondre aux besoins de chauffage, de refroidissement, d'éclairage naturel et de ventilation. L'intégration d'outils d'analyse bioclimatique dans les pratiques quotidiennes de conception urbaine ou architecturales est un défi mais une étape essentielle pour réaliser une conception efficace et respectueuse du climat.

Dans ce chapitre, nous examinerons les caractéristiques bioclimatiques des différentes zones climatiques de l'Algérie et identifierons les stratégies et les caractéristiques environnementales recommandées pour chaque zone en vue d'une conception bioclimatique optimale. Nous évaluerons le potentiel de quelques stratégies passives à l'aide de méthodes analytiques basées sur le diagramme psychrométrique.

Plusieurs outils analytiques sont disponibles pour quantifier l'efficacité potentielle des stratégies de conception, par exemple l'outil ECOTECH [1] et le Climate Consultant [2].

Nous avons utilisé Climate Consultant 6.0, un logiciel de conception développé par « Center for the Built Environment » de l'Université de Californie à Berkeley et qui est accessible sur internet.

### III.2 Présentation du logiciel : Climate consultant

Climate consultant est un logiciel puissant et facile à utiliser. C'est un excellent outil de conception énergétique qui permet de visualiser les différents attributs d'un climat avec leur représentation graphique.

Les principales fonctionnalités de Climate Consultant 6.0 comprennent :

- **Analyse climatique** : Accès à une large gamme de données climatiques, permettant d'analyser la température, l'humidité, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et d'autres variables climatiques pour des emplacements spécifiques.
- **Stratégies de conception passive** : Climate Consultant aide les utilisateurs à évaluer les stratégies de conception passive telles que, la protection solaire des fenêtres, l'inertie thermique, rafraîchissement évaporatif direct, la ventilation naturelle... pour optimiser la performance énergétique et le confort thermique.
- **Analyse solaire et éclairage naturel** : Évaluation des niveaux de rayonnement solaire et de la disponibilité de la lumière du jour à différents moments de l'année pour informer les décisions de conception de bâtiments liées à l'éclairage naturel, à l'ombrage solaire et aux systèmes d'énergie solaire.
- **Visualisation climatique** : Outils de visualisation incluant des graphiques climatiques, des diagrammes de trajectoire solaire et des graphiques psychrométriques pour aider à comprendre et à communiquer efficacement les données climatiques.

- **Intégration de la simulation énergétique** : Intégration avec des logiciels de simulation énergétique des bâtiments tels qu'EnergyPlus et DOE-2 pour une modélisation énergétique détaillée et l'évaluation de la performance des systèmes de services du bâtiment, notamment le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC) et d'autres composants de bâtiments.

Climate Consultant offre le choix entre quatre modèles de confort :

- California energy code comfort model (option 1)
- ASHRAE standard 55 and current handbook of comfort model (option 2)
- ASHRAE handbook of fundamental comfort model up through 2005 (option 3)
- Adaptive comfort model in ASHRAE Standards 55-2010 (option 4).

Chaque modèle définit les critères de confort sur lesquelles est basé la définition des zones de confort relatives aux différentes stratégies de conception passive.

### III.3 Principe de l'Analyse Bioclimatique avec Climate Consultant

Le diagramme psychrométrique (figure III.1) est l'un des outils de conception les plus puissants du Climate Consultant. Il indique la température sèche en bas et la teneur en humidité de l'air en haut. Cette échelle verticale est également appelée humidité absolue et peut être représentée par le taux d'humidité en grammes d'eau par kilogramme d'air sec, ou comme la pression de vapeur. La ligne courbe à l'extrême gauche est la ligne de saturation (ligne d'humidité relative à 100 %) qui représente le fait qu'à des températures plus basses, l'air peut contenir moins d'humidité qu'à des températures plus élevées. Chaque heure du fichier de données climatiques utilisé dans l'analyse est représentée par un point sur ce graphique. Certains points peuvent représenter plus d'une heure, par exemple lorsqu'une température et une humidité données se produisent plus d'une fois au cours d'un mois. Le point d'une heure donnée peut répondre aux critères de plus d'une zone stratégique. Dans ce cas, il est pris en compte dans le pourcentage d'heures pour les deux zones, ce qui explique que la somme des pourcentages soit supérieure à 100 %.

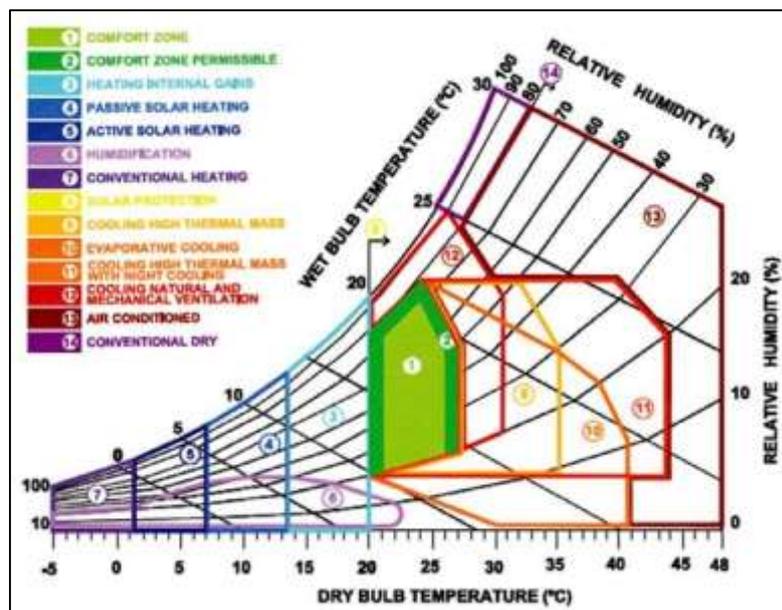


Figure III.1. Diagramme psychrométrique de GIVONI, 1992 [3]

La carte indique les meilleures stratégies de conception applicables au climat considéré dans l'analyse parmi les quinze (15) proposées (Figure III.2).

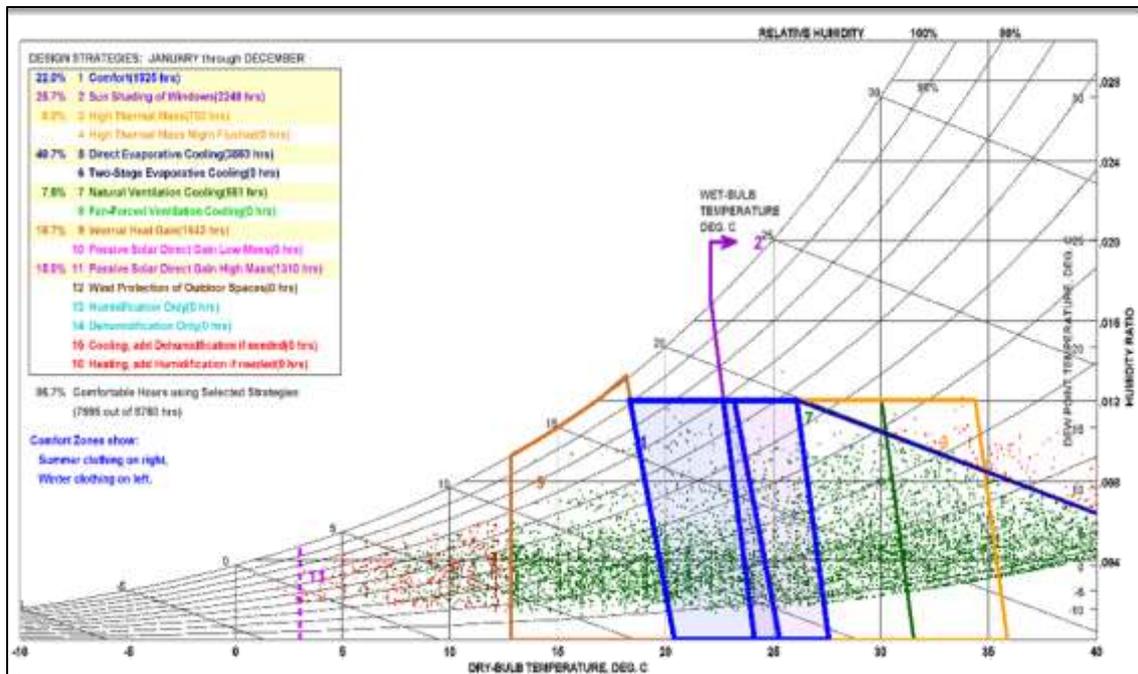


Figure III.2. Stratégies de Confort Thermique : Une Approche Psychrométrique

Le logiciel nécessite des données météorologiques sous format EPW (Energy Plus Weather), telles que la température sèche, la température humide, l'humidité relative, la pression atmosphérique, le rayonnement solaire, la direction et la vitesse du vent. Elles représentent des conditions météorologiques typiques et conviennent donc aux calculs d'éclairage naturel. Le pas de temps typique dans ces fichiers est d'une heure, et les fichiers contiennent des données pour une période d'un an. Les fichiers concernant de nombreux endroits de la planète peuvent être consultés sur le site de Energy Plus [4] et One Building [5].

### III.4 Le climat en Algérie

L'Algérie est située au nord du continent africain en bordure de la mer Méditerranée. L'immense superficie de l'Algérie donne naissance à un climat très varié selon un axe Nord-Sud :

- **Le Tell (côte)** : Caractérisé par un climat méditerranéen.
- **Les hauts plateaux** : Possèdent un climat plus rude avec un hiver froid et neigeux et un été chaud et sec, qualifié de "semi-aride".
- **Le Sahara** : Caractérisé par un climat aride très chaud, avec un contraste marqué des températures diurnes.

Les zones climatiques en Algérie (Figure III.3) offrent une diversité saisissante, allant des côtes méditerranéennes aux déserts du Sahara, en passant par les montagnes de l'Atlas. Comprendre ces zones climatiques est essentiel pour saisir les multiples facettes de l'environnement et des modes de vie en Algérie.

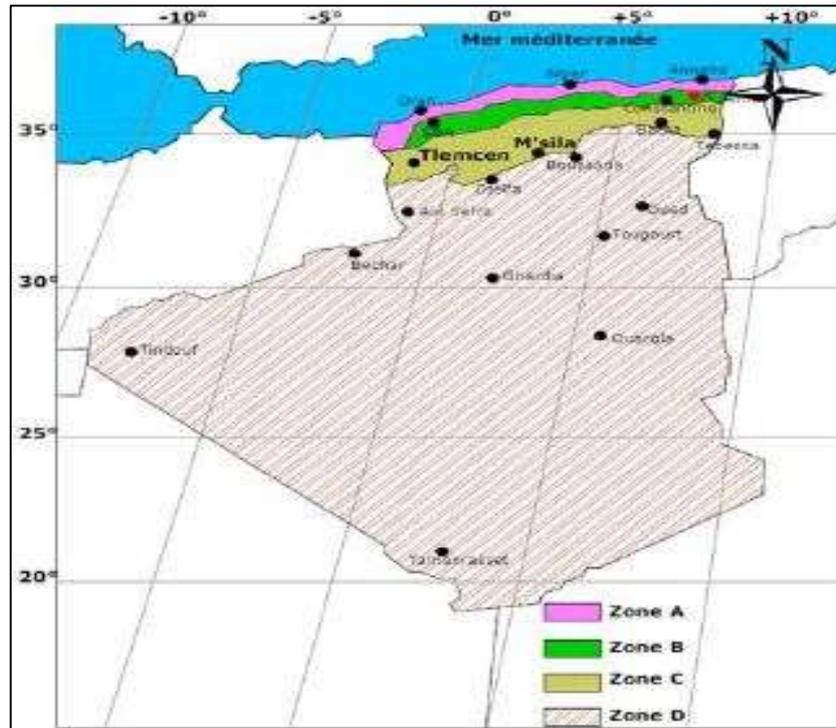


Figure III.3. Classification du climat en Algérie [6]

Comme indiqué sur la figure, quatre (4) zones climatiques sont définies en Algérie [D.T.R.C3-2]. Les principales caractéristiques de chaque zone sont résumées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Caractéristiques principales de chaque zone climatique.

Zone	Caractéristique
<b>Zone A</b>	Comprend le rivage de la mer et parfois le versant nord et les chaînes côtières, Spectre climatique varié : étés chauds avec soleil abondant et peu de pluies, hivers modérés avec humidité peu élevée.
<b>Zone B</b>	Comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien ; inclut une sous-zone B' qui comprend la vallée du Chellif, hiver froid, été chaud et sec.
<b>Zone C</b>	Comprend les Hauts-Plateaux entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, hiver long et frais, été très chaud et sec.
<b>Zone D</b>	Le Sahara, avec une sous-zone d'hiver froid et sec, été chaud et aride.

L'étude psychrométrique portera sur toutes les zones définies dans le règlement Algérien. Les différentes villes sélectionnées, pour la suite du travail, pour représenter les divers climats sont les suivantes :

- Alger pour la zone A
- Constantine pour la zone B
- Relizane pour la zone B'
- Sétif pour la zone C
- Bechar pour la zone D
- Tamanrasset pour la zone D'

Les données climatiques des différentes villes considérées ont été obtenues en utilisant le logiciel Onebuilding.org [5].

Les températures et les humidités relatives moyennes mensuelles pour les différentes villes sont représentées dans le tableau III.2.

**Tableau III.2.** Températures moyennes ( $T^\circ$ ) et humidités (HR) mensuelles des différentes villes représentatives

Mois		ALGER	CONSTANTINE	RELIZANE	SETIF	BECHAR	TAMANRASSET
Janvier	T° (°C)	13	7	10	5	10	13
	HR (%)	70	73	79	83	51	39
Février	T° (°C)	13	9	13	6	13	17
	HR (%)	72	69	70	72	36	27
Mars	T° (°C)	14	10	14	8	17	21
	HR (%)	72	71	67	71	29	23
Avril	T° (°C)	16	13	16	11	21	27
	HR (%)	73	73	70	66	30	21
Mai	T° (°C)	16	13	16	11	21	27
	HR (%)	69	61	60	62	19	14
Juin	T° (°C)	22	22	26	21	31	36
	HR (%)	72	55	56	55	19	12
Juillet	T° (°C)	26	27	29	25	35	37
	HR (%)	68	42	50	45	16	13
Aout	T° (°C)	26	26	29	25	34	37
	HR (%)	71	56	50	52	18	15
Septembre	T° (°C)	24	22	25	20	29	33
	HR (%)	70	65	57	60	27	19
Octobre	T° (°C)	21	17	20	15	21	26
	HR (%)	65	69	60	71	38	27
Novembre	T° (°C)	17	12	15	9	15	19
	HR (%)	67	68	70	74	36	38
Décembre	T° (°C)	14	7	12	6	11	15
	HR (%)	69	73	83	77	46	41

### III.5 Les différentes stratégies passives considérées dans l'étude

Dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, plusieurs stratégies passives sont utilisées pour réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort thermique. Nous avons choisi d'évaluer le potentiel de quelques-unes d'entre elles, à savoir :

- Protection solaire des fenêtres
- Masse thermique élevée
- Refroidissement direct par évaporation
- Ventilation naturelle
- Chauffage solaire passif

Pour chaque ville, le potentiel de chaque stratégie a été évalué pour deux périodes distinctes : la période d'hiver et la période d'été.

Les périodes d'été et d'hiver diffèrent d'une zone à une autre selon les conditions climatiques. Le tableau III.3 montre la durée de chaque saison (en mois et en heures) pour chacune des villes sélectionnées. Ces périodes ont été choisies en fonction des températures mensuelles moyennes élevées et/ou basses de chaque ville.

**Tableau III.3.** Les périodes d'été et d'hiver pour les différentes zones climatiques

Zone	Période de chauffage	Heure	Période de rafraîchissement	Heure
Zone A	Novembre - Avril	7296 - 11640	Juillet - Août	4344 - 5832
Zone B	Octobre - Mai	6552 - 12384	Juin - Septembre	3624 - 6552
Zone B'	Novembre - Avril	7296 - 11640	Juin - Août	3624 - 5832
Zone C	Octobre - Mai	6552 - 12384	Juin - Août	3624 - 5832
Zone D	Novembre - Mars	7296 - 10920	Mai - Septembre	2880 - 6552
Zone D'	Décembre - Février	8016 - 10176	Avril - Septembre	2160 - 6552

## III.6 Résultats et discussions

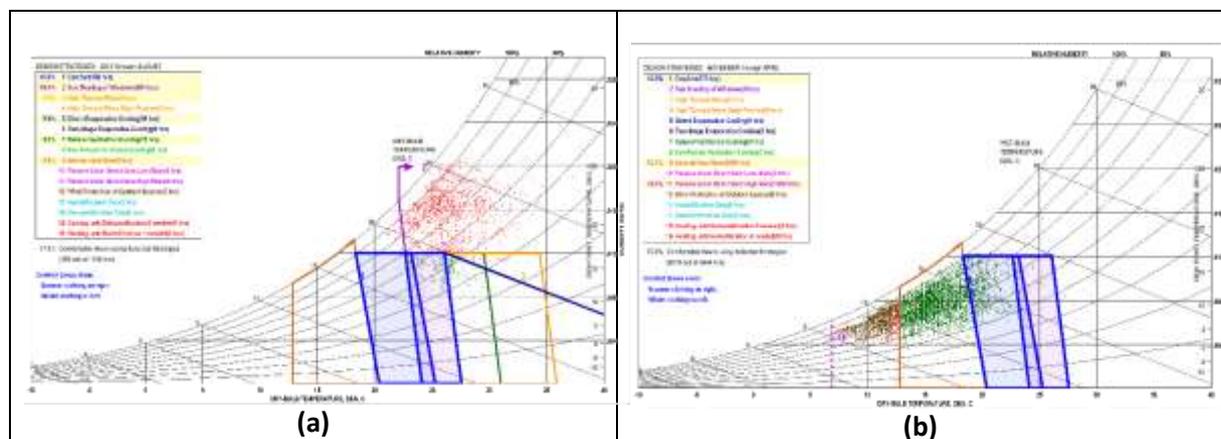
### III.6.1 Analyse Psychrométrique des différentes Villes représentatives

Les cartes psychrométriques ont été tracées en utilisant le logiciel Climate Consultant. Le modèle ASHREA Standard 55 et le modèle actuel du Handbook of Fundamentals, été choisi pour évaluer le confort [7]. Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- Pour la période d'été  $clo = 0.5$  (Vêtements légers) ;
- Pour la période d'hiver  $clo = 1$  (Vêtements légèrement chauds) ;
- Activité sédentaire à légère (métabolisme)  $Met = 1.2$  ;
- Vitesse du vent entre  $v = 0.2$  et  $1.5 \text{ m s}^{-1}$ .

Les cartes psychrométriques des différentes villes sont représentées par les figures III.4 à III.9.

#### ❖ La ville d'Alger (voir annexe 1)



**Figure III.4.** Diagramme psychrométrique de la ville de Alger

(a) ETE

(b) HIVER

Les résultats de l'analyse psychrométrique révèlent la plage de confort durant les saisons estivale et hivernale, ainsi que le pourcentage de confort procuré par les stratégies passives.

Pour la période d'été, les résultats montrent que seulement 10.6% des heures sont confortables naturellement. L'ombrage des fenêtres est la stratégie la plus prépondérante, contribuant à 39% du confort total (581 heures). Cependant, les méthodes de refroidissement, telles que l'évaporatif direct

et la ventilation naturelle, ajoutent respectivement 5.9% (88 heures) et 5.2% (78 heures) de confort supplémentaire. Malgré ces efforts, seulement 17.3% des heures (258 heures sur 1488) atteignent un niveau de confort adéquat, soulignant la nécessité d'améliorer les stratégies de gestion de la chaleur durant cette période chaude.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites pour cette zone :

- Placer les ouvertures des portes et fenêtres sur des côtés opposés, avec de plus grandes ouvertures orientées dans le sens du vent dominant afin de favoriser la ventilation transversale.
- Favoriser les protections solaires efficaces pour les fenêtres.
- Minimiser ou éliminer les vitrages orientés à l'ouest pour réduire les apports de chaleur l'après-midi.
- Utiliser des matériaux de toiture et de façade réfléchissants pour réduire l'absorption de chaleur

Durant la période d'hiver, le nombre d'heure naturellement confortable est 578 heures, avec 13.3%. L'apport de chaleur interne est significatif, augmentant le confort de 62.1% (2699 heures), et le chauffage solaire passif a gain directe contribue à 33.6% (1458 heures) du temps de confort supplémentaire. Ensemble, ces stratégies permettent d'atteindre 87.8% des heures confortables (3815 heures sur 4344), démontrant une gestion efficace du froid et de la faible isolation durant les mois d'hiver.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

- Utiliser des matériaux avec une bonne capacité thermique (comme le béton, la brique) pour absorber la chaleur pendant la journée et la restituer la nuit.
- Maximiser l'ensoleillement en utilisant de grandes fenêtres orientées au sud et en évitant l'ombrage pendant la journée.
- Utiliser des isolants extérieurs pour améliorer l'efficacité thermique.

### ❖ La ville de Constantine (voir annexe 2)

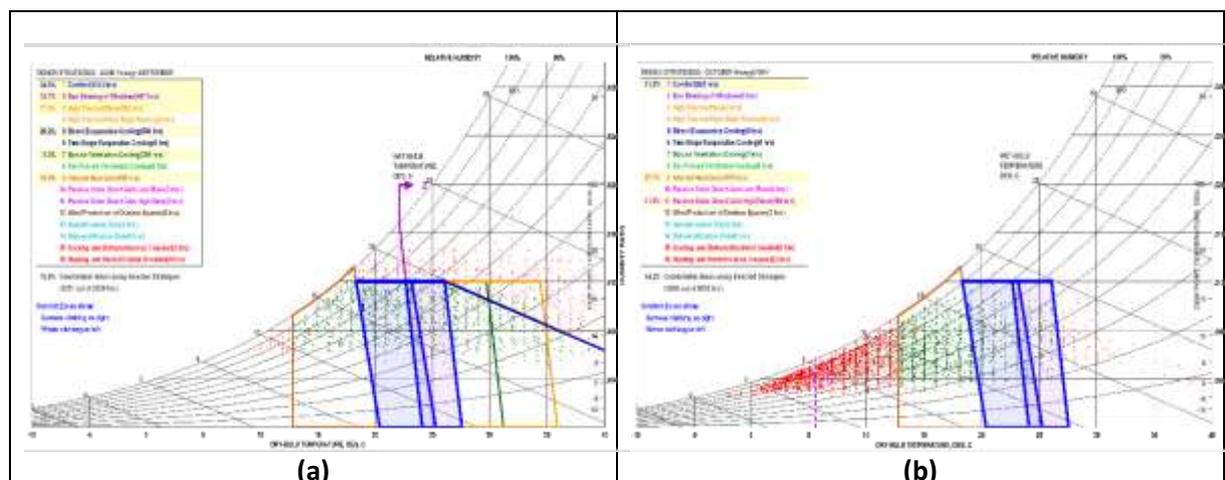


Figure III.5. Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine

(a) ETE

(b) HIVER

Durant l'été, Constantine expérimente un temps de confort assez important atteignant 34.6% de ses heures comme naturellement confortables, soit (1013/2928). Cela est principalement dû aux taux d'humidité modérés et aux températures nocturnes qui ne sont pas trop élevées. L'ombrage des fenêtres joue un rôle crucial en contribuant à 32.7% du confort (957 heures), aidant à contrôler l'apport de chaleur par rayonnement solaire. Les systèmes de refroidissement évaporatif sont également efficaces, avec un refroidissement évaporatif direct ajoutant 20.2% de confort (590 heures). La masse thermique élevée contribue également, ajoutant 17.9% (524 heures) de confort grâce à sa capacité à absorber la chaleur pendant les heures les plus chaudes et à la relâcher durant les heures les plus fraîches. La ventilation naturelle a eu un impact moindre comparé aux autres approches passives ajoutant 8.2% du temps de confort (239 heures). L'application des stratégies passives a permis d'augmenter significativement le pourcentage d'heures confortables, atteignant désormais 75.9 %.

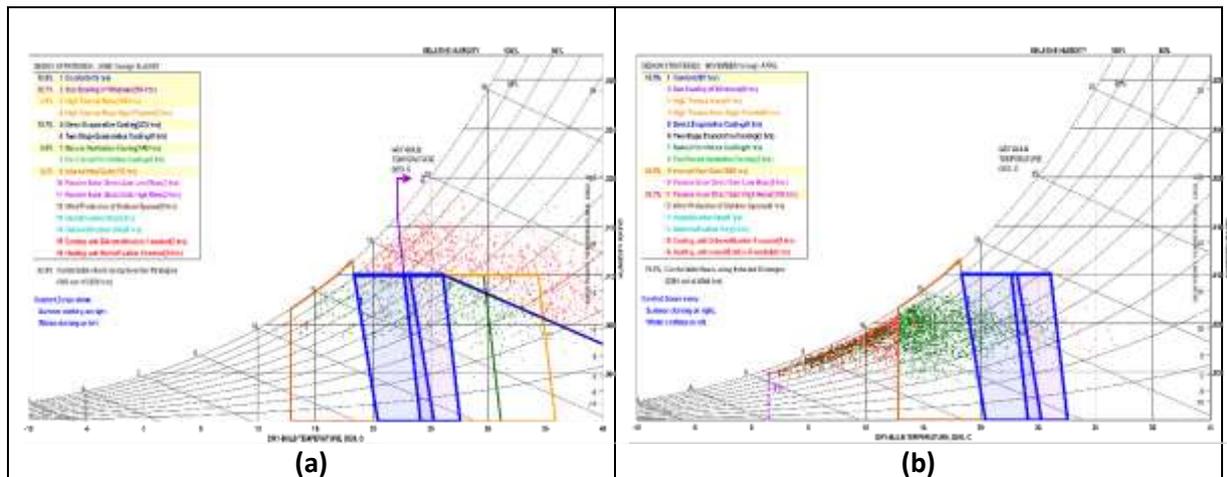
Les recommandations suivantes peuvent être déduites pour cette zone :

- Installer des dispositifs d'ombrage pour réduire le gain de chaleur solaire direct, comme des stores, des auvents, ou des volets.
- Minimisez ou éliminez les vitrages orientés à l'ouest pour réduire le gain thermique en été et en automne.
- Placez les portes et les fenêtres sur les côtés opposés des bâtiments.
- Utiliser des fenêtres à double vitrage pour réduire les pertes de chaleur.
- Utiliser des stores et rideaux épais pour réduire les pertes de chaleur pendant la nuit.

Pendant la période d'hiver les conditions climatiques naturelles procurent 653 heures de confort, soit 11.2% du temps total, indiquant qu'un certain degré de confort est atteint sans intervention, malgré des températures hivernales, les gains thermiques améliorent le confort de 27.7%. Le chauffage solaire passif a gain direct ajoute 688 heures supplémentaire de confort, cette stratégie utilise les apports solaires pour réchauffer efficacement les espaces intérieurs.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites pour cette zone :

- Maximiser l'ensoleillement en utilisant de grandes fenêtres orientées au sud et en évitant l'ombrage pendant la journée.
- Utiliser des surfaces intérieures massives telles que des sols en dalle, des murs massifs et une cheminée en pierre pour stocker la chaleur passive en hiver et la fraîcheur nocturne en été.
- Utiliser des matériaux légers, des murs opérables et des espaces extérieurs ombragés.
- Utiliser des rideaux thermiques sur les fenêtres pour ajouter une couche d'isolation.

❖ **La ville de Relizane (voir annexe 3)**

**Figure III.6.** Diagramme psychrométrique de la ville de Relizane  
**(a) ETE** **(b) HIVER**

Pendant les mois d'été, Relizane bénéficie de 419 heures confortables naturellement. L'ombrage des fenêtres est la stratégie la plus efficace avec 38.7%, contribuant à 854 heures de confort supplémentaires. Le refroidissement évaporatif direct, adapté au climat sec de Relizane, est également une stratégie importante, représentant 13.7% avec 303 heures supplémentaires. Les masses thermiques, qui absorbent et libèrent de la chaleur, ajoutent significativement au confort avec 196 heures (8.9%), la ventilation naturelle améliore de manière significative le confort, ajoutant ainsi 145 heures de confort supplémentaires, ce qui représente 6.6% du temps total. Grâce à l'application des stratégies sélectionnées, 40.9 % des heures estivales sont désormais considérées comme confortables.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites pour cette zone :

- Humidifier l'air chaud et sec avant qu'il n'entre dans les espaces intérieurs fermés.
- Minimiser ou éliminer les vitrages orientés à l'ouest pour réduire le gain thermique en été et en automne.
- Placer les portes et les fenêtres sur les côtés opposés des bâtiments.
- Utiliser une isolation extérieure et exposez la masse à l'intérieur ou ajoutez du plâtre ou un contact direct avec les cloisons sèches permet une meilleure régulation des températures intérieures, et un confort thermique amélioré tout au long de l'année.

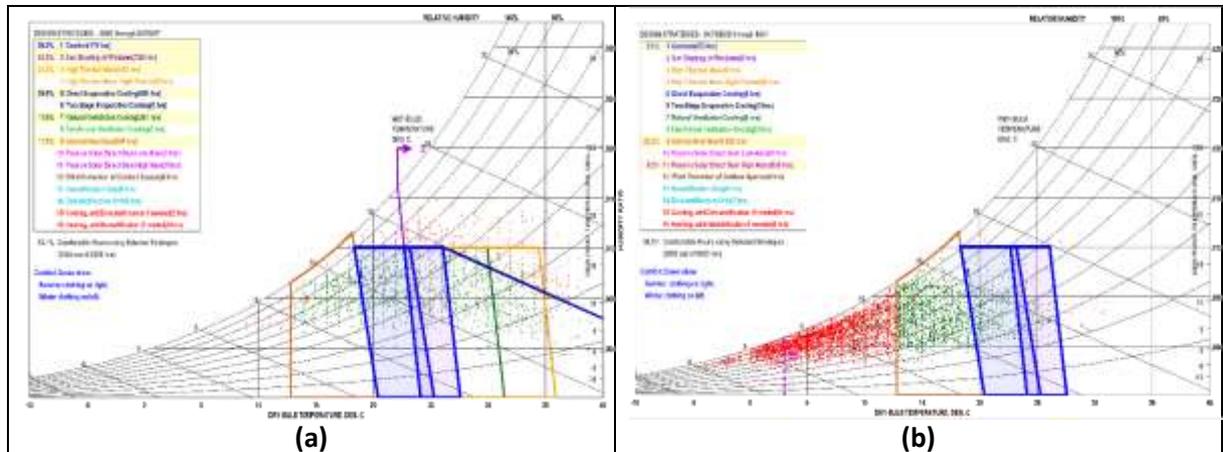
Durant l'hiver les méthodes pour gérer le confort thermique se concentrent principalement sur l'utilisation du chauffage solaire passif. Le gain de chaleur interne contribue de manière significative à l'amélioration du temps de confort, représentant 43.6% du temps total, soit 1896 heures et l'utilisation du chauffage solaire passif ajoute 30.7% (1334 heures). Ces stratégies permettent d'atteindre 75.8% d'heures confortables sur l'ensemble de la période hivernale.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites pour cette zone :

- Orienter la majorité des surfaces vitrées vers le sud pour maximiser l'exposition solaire en hiver, tout en utilisant des auvents pour une ombre complète en été.

- Les sols et murs à haute inertie thermique permettent de stocker la chaleur en hiver pour une diffusion lente

❖ **La ville de Sétif (voir annexe 4)**



**Figure III.7. Diagramme psychrométrique de la ville de Sétif**  
**(a) ETE** **(b) HIVER**

Durant l'été, Sétif enregistre un confort naturel pour 35.3% des heures, soit 779 sur 2208 heures. L'utilisation du refroidissement évaporatif direct se révèle particulièrement efficace, ajoutant 25.6% de confort (565 heures). La stratégie de la masse thermique élevée joue également un rôle important, ajoutant 21.2% (468 heures) d'heure de confort. La ventilation naturelle est aussi notable, ajoutant 565 heures de confort (25.6%). L'application de ces stratégies augmente le confort à 1834 heures soit 83.1%.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

- Utiliser un refroidisseur évaporatif peut offrir une capacité de refroidissement adéquate, permettant ainsi de réduire voire d'éliminer le besoin de climatisation conventionnelle.
- Favoriser la ventilation transversale en plaçant les ouvertures de portes et fenêtres sur des côtés opposés, avec de plus grandes ouvertures orientées dans le sens du vent dominant.
- Fournir suffisamment de vitrage au nord (environ 5% de la surface du sol) pour équilibrer l'éclairage naturel tout en permettant une ventilation croisée efficace.

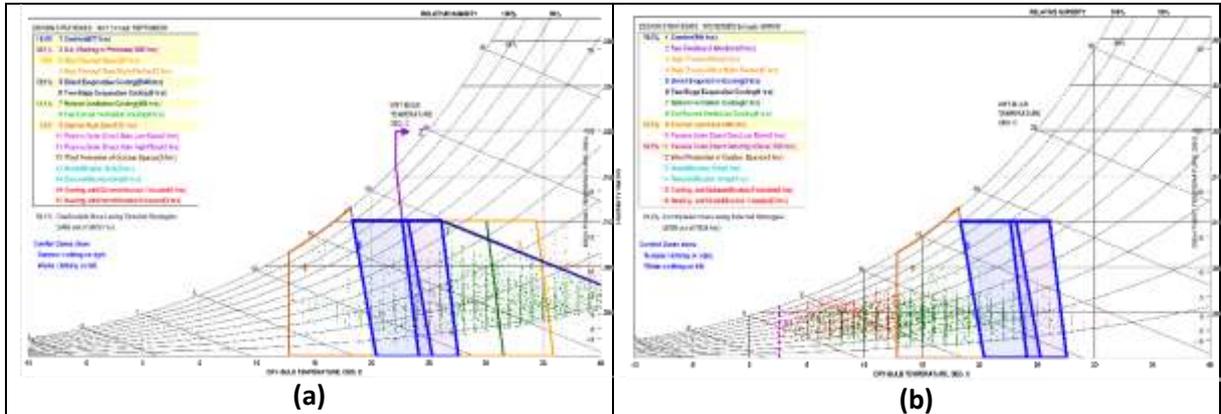
En hiver, le confort naturel représente seulement 8.1% des heures soit 472 sur 4832. Cependant, le gain de chaleur interne est important pendant les mois froids, augmentant significativement le confort de 43.6% du temps (1896 heures). Le chauffage solaire passif présente un taux d'amélioration de confort significatif de 30.7% (1334 heures). Ces stratégies combinées permettent d'atteindre 75.8% d'heures confortables sur la période hivernale.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

- Disposer les surfaces vitrées principalement sur le côté sud du bâtiment afin d'optimiser les gains solaires.
- Utiliser des murs à haute masse thermique est particulièrement efficace pour le chauffage solaire passif.

- Utiliser un système d'isolation thermique par l'extérieur (ITE), afin d'exposer la masse thermique à l'intérieur du bâtiment. De plus, l'ajout de plâtre ou de Placoplâtre directement en contact avec le mur peut améliorer le stockage de la chaleur.
- Organiser le plan d'étage de manière à ce que le soleil d'hiver pénètre dans les espaces de vie utilisés durant la journée.

❖ **La ville de Bechar (voir annexe 5)**



**Figure III.8.** Diagramme psychrométrique de la ville de Bechar

(a) ETE

(b) HIVER

Pendant l'été, Béchar affiche un confort naturel pendant 677 heures (18.4%). Le refroidissement évaporatif direct, adapté au climat sec de Béchar, est particulièrement efficace, fournissant 72.1% du temps de confort grâce à 2646 heures supplémentaires. L'ombrage des fenêtres joue un rôle important, contribuant à 38.1% du temps de confort (1400 heures). Cela est crucial pour réduire le gain de chaleur solaire direct pendant les mois les plus chauds. Quant à la ventilation naturelle, elle améliore le temps de confort de 406 heures. De plus, la masse thermique élevée contribue à une augmentation de 7.8% du temps de confort. Ces stratégies cumulées permettent d'atteindre 94.1% d'heures confortables sur la période estivale, soulignant une gestion efficace de la chaleur excessive.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

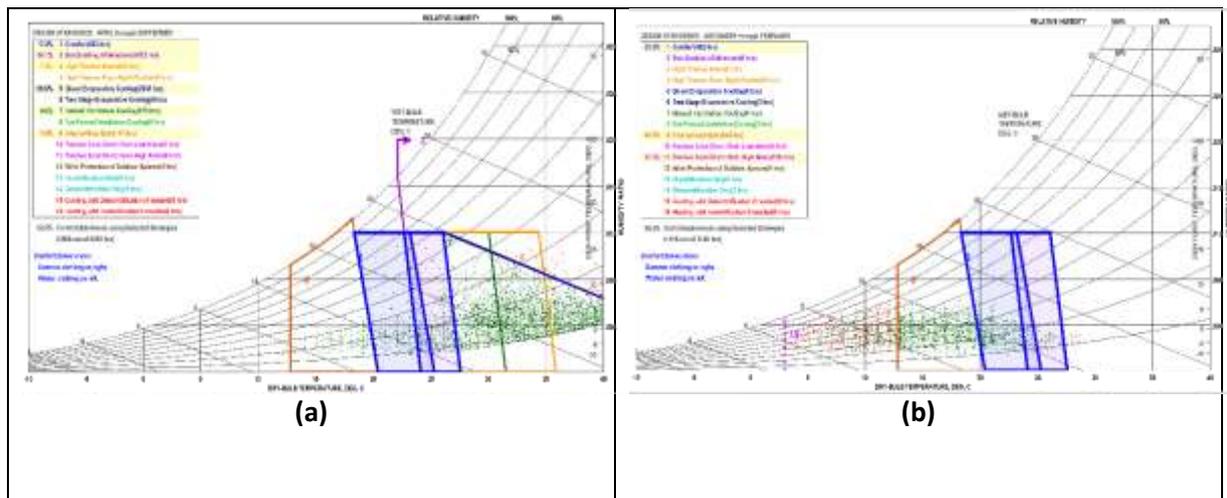
- Optimiser la ventilation par tirage naturel, en maximisant la hauteur verticale entre l'entrée et la sortie d'air pour améliorer l'efficacité de la ventilation.
- Utiliser des matériaux de construction de couleur claire et des toits frais à haute émissivité pour réduire les gains thermiques par conduction.
- Utiliser des vitrages à double vitrage avec un revêtement haute performance (Low-E) sur les façades orientées vers l'ouest, le nord et l'est.

En hiver, le confort naturel est présent pour 15.0% des heures. Les gains de chaleur interne augmentent le confort pendant 38.8% du temps (1406 heures), tandis que le chauffage solaire passif ajoute 36.6% (1325 heures) aux heures de confort. Ces méthodes permettent d'obtenir 78.2% d'heures confortables, illustrant une excellente utilisation de la chaleur passive et des gains internes pour combattre le froid.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

- Favoriser les stores isolants, les rideaux lourds ou les volets extérieurs pour réduire efficacement les pertes de chaleur nocturnes en hiver.
- Les murs de masse élevée sont essentiels pour stocker la chaleur passive en hiver et la fraîcheur nocturne en été.
- Utiliser les surfaces intérieures de masse élevée, telles que les sols en dalle, les murs épais et les cheminées en pierre, pour stocker la chaleur passive en hiver et la fraîcheur nocturne en été.

❖ **La ville de Tamanrasset (voir annexe 6)**



**Figure III.9. Diagramme psychrométrique de la ville de Tamanrasset**  
**(a) ETE (b) HIVER**

Durant les mois d'été, la figure indique un confort naturel à 13.3%, soit 583 heures. Le refroidissement évaporatif direct est la stratégie la plus impactante, offrant 66.9% du confort, ce qui équivaut à 2938 heures. L'ombrage des fenêtres joue un rôle clé avec 38.1%, ou 1672 heures de contribution à l'amélioration du confort. D'autres contributions mineures de 323 et 379heures incluent la masse thermique élevée et la ventilation naturelle respectivement. Globalement, ces stratégies rendent confortables 83.5% des heures durant cette période, soit 3668 heures sur 4392.

Pour favoriser la plage de confort dans la ville de Tamanrasset, il est recommandé :

- Utiliser des auvents de fenêtres ou des parasols adaptés à l'altitude du locale. Ces éléments réduisent les gains thermiques par rayonnement solaire.
- Choisir des matériaux de construction de couleur claire et des toits avec une haute émissivité pour minimiser les gains thermiques par conduction.
- Adopter les principes des maisons passives traditionnelles dans les climats chauds et secs, avec des murs épais et des ouvertures ombragées et récessives, favorise la ventilation nocturne et le refroidissement naturel du bâtiment, réduisant ainsi la nécessité de climatisation.

Durant les mois d'hiver, Tamanrasset expérimente 22.8% de confort naturel, totalisant 492 heures. En considérant les apports thermiques, il est possible d'améliorer le confort thermique de manière significative, pouvant atteindre une amélioration de 43.8%, soit 945 heures supplémentaires, tandis que la masse thermique élevée avec gain solaire direct passif ajoute 799 heures, représentant 37% du total. Ces stratégies combinées portent le nombre d'heures confortables à 84 %, soit 1815 heures sur 2160.

Les recommandations suivantes peuvent être déduites :

- Utiliser des surfaces intérieures à capacité thermique élevée comme le carrelage, l'ardoise, la pierre, la brique ou l'adobe, bénéfiques en hiver pour stocker la chaleur pendant la journée et la redistribuer la nuit, aidant à maintenir une température intérieure stable et confortable.
- Choisir des toits à faible pente avec de larges auvents, qui fonctionnent bien dans les climats tempérés. Cela permet de réduire les gains thermiques par rayonnement solaire.
- Réduire les gains de chaleur en maintenant la maison bien fermée et bien isolée. Cela permet de réduire les besoins en chauffage et ainsi les besoins en énergie pour le refroidissement.

### III.6.2 Potentiel de confort de chaque stratégie

Dans cette section, le potentiel de confort des différentes stratégies passives étudiées est évalué en calculant le taux d'amélioration des heures de confort par rapport à la situation de référence (sans aucune stratégie).

#### III.6.2.1. Ventilation Naturelle

Le tableau III.4 résume le nombre d'heures de confort sans et avec ventilation naturelle (notée VN), ainsi que le taux d'amélioration du confort dans les différentes villes calculées par l'expression :

$$T = \frac{\text{nombre d'heures avec stratégie passive} - \text{nombre d'heures sans stratégie}}{\text{nombre d'heures de la période simulée}}$$

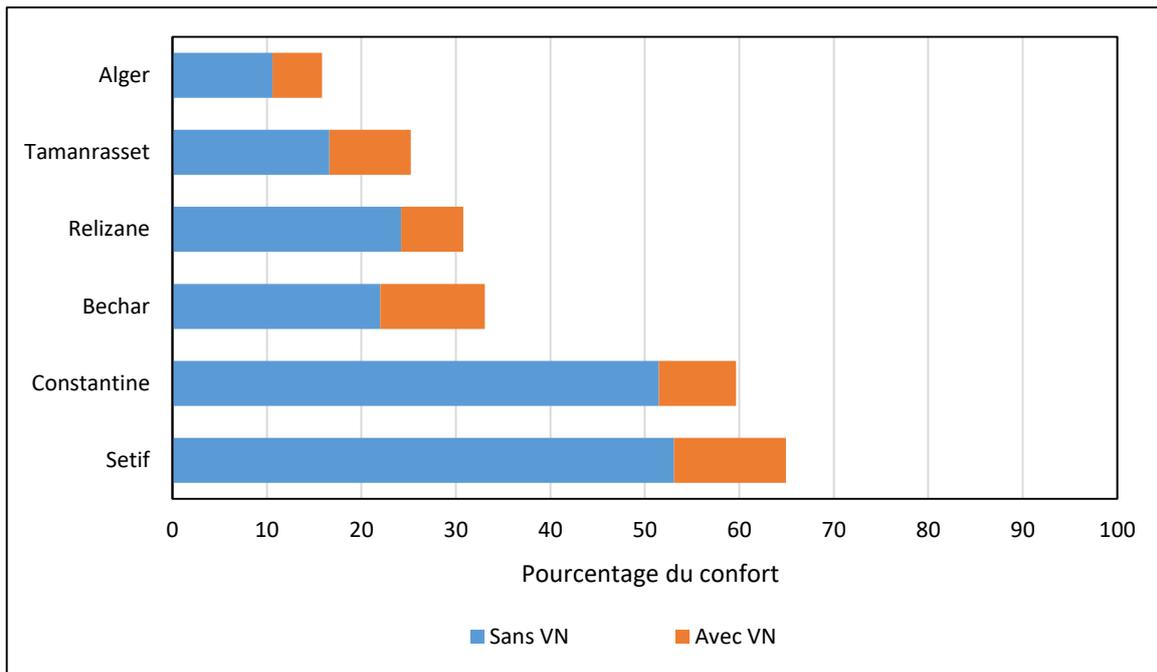
**Tableau III.4.** Temps de confort sans et avec la ventilation naturelle dans les différentes villes

Ville	Sans VN		Avec VN		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
<b>Alger</b>	158	10.6	236	15.9	05.24
<b>Constantine</b>	1508	51.5	1747	59.7	08.16
<b>Relizane</b>	535	24.2	680	30.8	06.57
<b>Sétif</b>	1172	53.1	1433	64.9	11.82
<b>Bechar</b>	809	22.0	1215	33.1	11.06
<b>Tamanrasset</b>	730	16.6	1109	25.3	08.63

On remarque que la ventilation naturelle a amélioré le confort dans toutes les villes étudiées.

La ville de Sétif a obtenu la meilleure amélioration du confort avec un taux de 11.82%, tandis que la ville d'Alger affiche l'amélioration la moins élevée avec un taux de 5.24%. Les villes de Constantine, Bechar, Relizane et Tamanrasset ont également vu des améliorations significatives du confort. Ces résultats indiquent que la mise en œuvre de la ventilation naturelle a un impact positif sur le confort thermique dans toutes les zones climatiques en Algérie.

Les améliorations résultantes sont mieux illustrées sur la figure III.10.



**Figure III.10** Effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique dans les différentes villes.

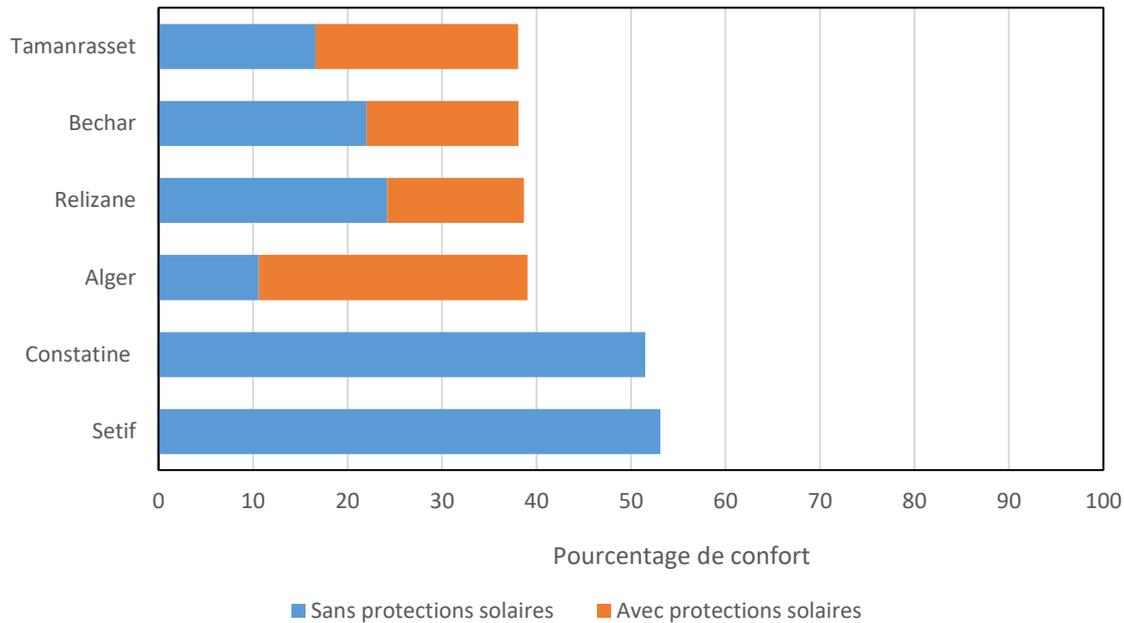
### III.6.2.2. Effet de la protection solaire des fenêtres et des ombrages

Les résultats quantitatifs de l'analyse psychrométrique, avant et après l'introduction des dispositifs d'ombrage, sont synthétisés dans le tableau III.5.

**Tableau III.5.** Potentiel des dispositifs d'ombrages dans les différentes villes

Ville	Sans protection des fenêtres		Avec protection des fenêtres		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
<b>Alger</b>	158	10.6	581	39.0	28.43
<b>Constantine</b>	1508	51.5	1508	51.5	0.00
<b>Relizane</b>	535	24.2	854	38.7	14.45
<b>Sétif</b>	1172	53.1	1172	53.1	0.00
<b>Bechar</b>	809	22.0	1400	38.1	16.09
<b>Tamanrasset</b>	730	16.6	1672	38.1	21.45

L'analyse révèle que la stratégie déployée n'a pas engendré d'amélioration du confort thermique à Sétif et Constantine contrairement aux autres villes où des améliorations notables ont été observées. Des taux variant de 14.5% à Relizane à 28.5% à Alger. Ces résultats soulignent l'impact significatif des dispositifs d'ombrage sur le confort thermique, surtout dans les régions fortement exposées au soleil. Cette constatation met en lumière l'importance cruciale de ces dispositifs pour optimiser le confort thermique, comme le met en évidence le graphique figurant à la III.11.



**Figure III.11.** Pourcentage de temps de confort avant et après mise en œuvre des protections solaires

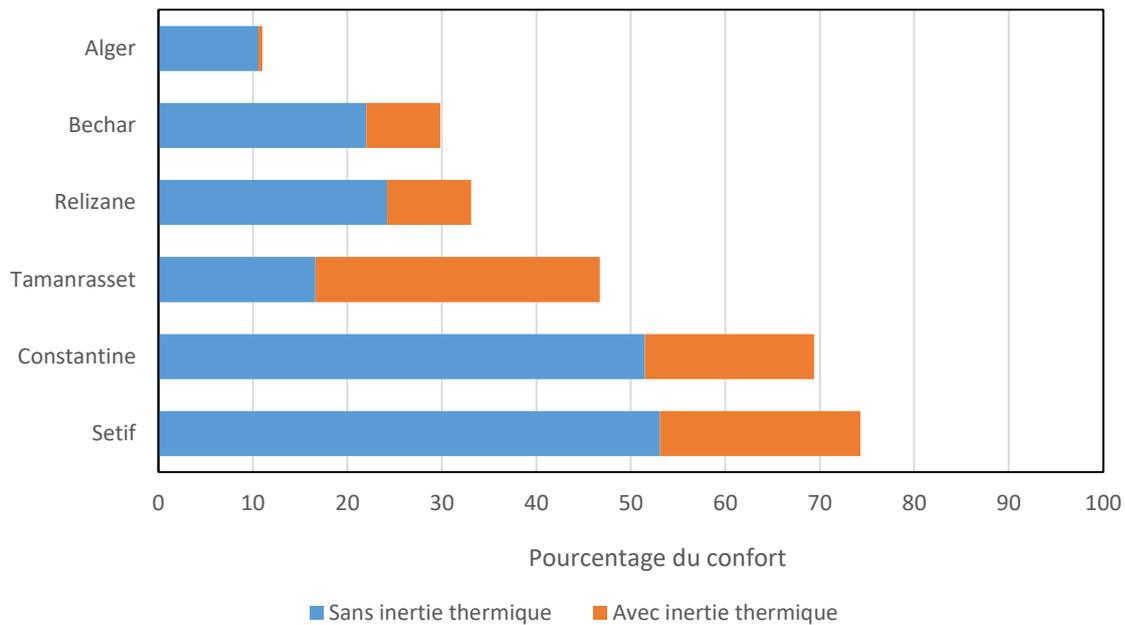
### III.6.2.3. Effet de l'inertie thermique

Les résultats obtenus avant et après l'application de cette stratégie ont été résumés dans le tableau III.6, mettant en évidence l'impact de l'inertie thermique élevée sur le confort intérieur.

**Tableau III.6.** Potentiel de l'inertie thermique pour le confort d'été

Ville	Sans inertie thermique		Avec inertie thermique		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
<b>Alger</b>	158	10.6	164	11.0	0.40
<b>Constantine</b>	1508	51.5	2032	69.4	17.90
<b>Relizane</b>	535	24.2	731	33.1	8.88
<b>Sétif</b>	1172	53.1	1640	74.3	21.20
<b>Bechar</b>	809	22.0	1096	29.8	7.82
<b>Tamanrasset</b>	730	16.6	2053	24.0	30.12

L'inertie thermique s'est révélée particulièrement efficace à Tamanrasset, où le nombre d'heures de confort a augmenté de 730 à 2053, soit une amélioration remarquable de 30%. Cette amélioration est suivie de près par Sétif et Constantine. En revanche, les autres villes montrent des résultats moins significatifs en termes d'amélioration du confort, indiquant que cette stratégie est plus efficace dans les climats chauds. Pour mieux visualiser l'impact de l'inertie thermique dans chaque ville, les pourcentages de temps de confort avant et après l'augmentation de l'inertie thermique sont présentés dans la figure III.12.



**Figure III.12.** Effet de l'augmentation de l'inertie thermique sur le confort

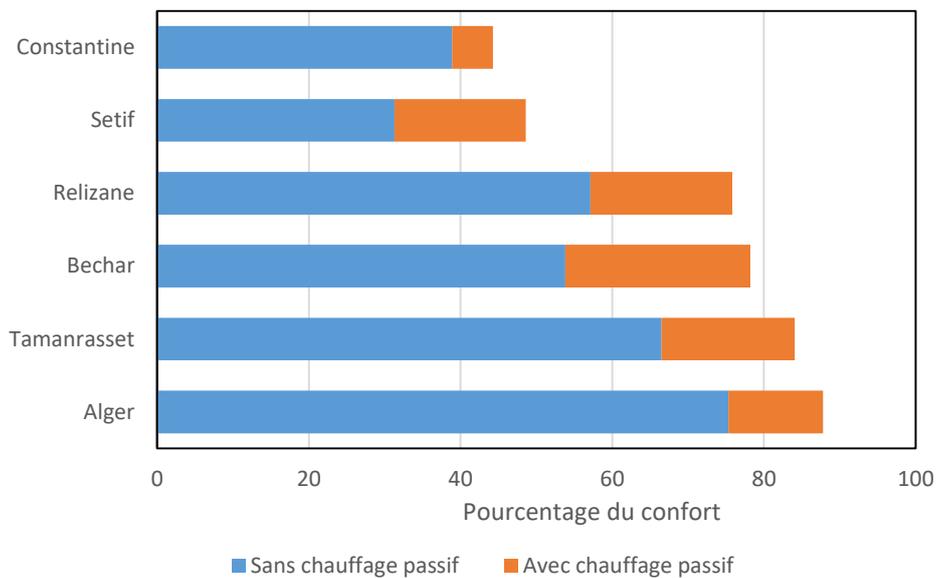
#### III.6.2.4. Effet de chauffage solaire passif

Dans notre recherche visant à améliorer le confort thermique, nous avons mis en œuvre le chauffage solaire passif en tant que stratégie de régulation thermique en hiver. Les résultats obtenus, tant avant qu'après l'application de cette méthode, sont présentés dans le tableau III.7. Ces données mettent en lumière l'impact significatif du chauffage solaire passif sur le confort intérieur.

**Tableau III.7.** Potentiel de chauffage solaire passif pour le confort

Ville	Etat initial		Avec chauffage solaire passif		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
<b>Alger</b>	3272	75.3	3815	87.8	12.50
<b>Constantine</b>	2268	38.9	2580	44.2	05.35
<b>Relizane</b>	2481	57.1	3294	75.8	18.72
<b>Sétif</b>	1823	31.3	2831	48.5	17.28
<b>Bechar</b>	1950	53.8	2835	78.2	24.42
<b>Tamanrasset</b>	1436	66.5	1815	84.0	17.55

Les résultats de notre recherche démontrent de manière concluante que l'utilisation du chauffage solaire passif conduit à une amélioration significative du confort thermique pendant les mois d'hiver dans toutes les zones climatiques étudiées. Les données indiquent une augmentation du confort thermique variant entre 5 % à Constantine et environ 24 % à Bechar. Pour une visualisation plus claire de ces résultats, nous avons élaboré un histogramme (voir Figure III.13) qui illustre le taux d'amélioration du confort thermique obtenu grâce à l'adoption du chauffage solaire passif.



**Figure III.13.** Impact du chauffage solaire passif sur le confort thermique

### III.7 Conclusion

L'analyse approfondie du potentiel bioclimatique des six zones climatiques en Algérie, réalisée à travers l'utilisation de graphes psychrométriques, a mis en lumière des variations significatives dans l'efficacité des stratégies passives appropriées à chaque région. Cette étude démontre de manière convaincante que l'adoption de stratégies passives, telles que la ventilation naturelle, les dispositifs d'ombrage, l'inertie thermique élevée et le chauffage solaire passif, constitue une approche particulièrement efficace pour améliorer le confort thermique dans toutes les zones climatiques de l'Algérie. En exploitant judicieusement les conditions climatiques locales, ces stratégies offrent des solutions durables et économiquement viables, adaptées aux besoins de confort thermique des habitants.

Les conclusions détaillées de l'analyse psychrométrique pour chaque zone sont les suivantes :

- Dans les zones A, B', et D, la protection solaire des fenêtres s'est révélée être la stratégie la plus efficace.
- Dans les zones B, C, et D', l'inertie thermique s'est avérée être la méthode la plus appropriée.
- Le chauffage solaire passif est particulièrement efficace en hiver, notamment dans les zones A et B'.
- La ventilation naturelle a notablement amélioré le confort thermique dans toutes les villes étudiées, avec un effet particulièrement prononcé dans les zones B et C.

Afin de tirer parti de ces stratégies, les mesures suivantes doivent être mises en œuvre :

- Utiliser des matériaux de construction à haute masse thermique, tels que les carreaux, la pierre, la brique ou l'adobe, afin de conserver la chaleur en hiver et maintenir la fraîcheur en été, régulant ainsi les températures intérieures de manière efficace.
- Maximiser l'exposition au soleil en hiver, tout en concevant des surplombs pour offrir de l'ombre en été.
- Appliquer une isolation extérieure sur les murs massifs, en utilisant des matériaux à haute masse thermique pour réguler les températures intérieures, particulièrement dans les climats chauds.

L'intégration de ces principes dans la conception architecturale et la planification urbaine non seulement crée des espaces habitables plus agréables, mais réduit également la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels.

## Références bibliographiques

[1] Autodesk ECOTECH Analysis

[2] <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>

[3] Berkouk, D. (2017). *Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra* (Thèse de doctorat).

[4] <https://www.energyplus.net/weather>

[5] <http://climate.onebuilding.org>

[6] Khodja, M. M. (2013). *Évaluation de la consommation énergétique des logements à haute performance énergétique de Tamanrasset et opportunité d'utiliser les systèmes solaires* (Mémoire de Magister en Génie Mécanique, spécialité: énergétique). Université Saad Dahlab Blida.

[7] [Manuel ASHRAE en ligne](#)

# **CHAPITRE IV**

Simulation numérique du confort thermique

## IV.1 Introduction

Dans le cadre de l'évaluation du confort thermique d'un local, la modélisation numérique est un outil essentiel pour analyser et prédire les performances énergétiques et les conditions intérieures. Le logiciel TRNSYS 16.1, avec son module TRNBUILD, permet une modélisation détaillée des bâtiments en tenant compte de divers paramètres comme les caractéristiques des matériaux de construction, les conditions d'occupation et les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

L'objectif de cette étude est de comparer les résultats de confort obtenus via la modélisation réalisée avec TRNSYS 16.1 à ceux fournis par l'analyse psychrométrique. Cette comparaison vise à évaluer l'efficacité et la précision des deux logiciels dans la prédiction des conditions de confort thermique, fournissant des informations précieuses pour la conception et la gestion des bâtiments.

## IV.2 Description de la construction simulée

Le bâtiment étudié est une pièce rectangulaire à un seul niveau, mesurant 8 mètres de large, 6 mètres de long et 3 mètres de haut, sans cloisons intérieures (figure IV.1). Il possède quatre fenêtres à simple vitrage sur le mur sud, représentant 25% de la surface totale du mur, ainsi qu'une porte en bois standard centrée sur le mur nord. Ce local étudié a été tiré de la littérature, il a fait l'objet d'une étude menée par A. SARRI *et al.* et intitulée « Effect of using PCMs and shading devices on the thermal performance of buildings in different Algerian climates. A simulation-based optimization » [1].

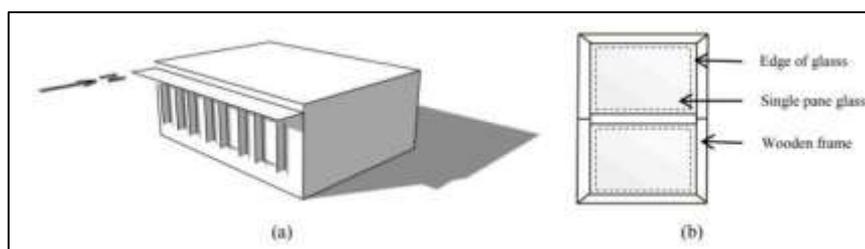


Figure IV.1. (a) description du local (b) description des fenêtres [1]

Les matériaux de construction utilisés sont typiques de l'Algérie et les fenêtres sont celles fréquemment utilisées dans les bâtiments algériens, à savoir des fenêtres à simple vitrage avec des cadres en bois.

### IV.2.1 Constitution et caractéristiques des parois

Les propriétés des parois du local étudié sont présentées dans les tableaux IV.1 à IV.4 [D.T.R. C 3-2].

Tableau IV.1. Composition du mur extérieur

Élément	Épaisseur [m]	$\lambda$ [KJ/hm K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [KJ/kg K]	R [m <sup>2</sup> K/KJ]	U (W/m <sup>2</sup> k)
Mortier de ciment	0.025	5.04	2200	0.940	0.0049	1.548
Brique creuse	0.100	2.52	1600	0.840	0.0396	
Lame d'aire	0.050	1.125	1	1.227	0.0444	
Brique creuse	0.100	2.52	1600	0.840	0.0396	
Enduit de plâtre	0.015	1.8	1300	0.936	0.0083	

**Tableau IV.2.** La composition du toit

Élément	Épaisseur [m]	$\lambda$ [KJ/m K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [KJ/kg K]	R [m <sup>2</sup> K/KJ]	U (W/m <sup>2</sup> k)
Mortier de ciment	0.025	5.04	2200	0.940	0.0049	0.638
EPS (polystyrène expansé)	0.050	0.144	25	1.380	0.3472	
Béton	0.200	6.12	2500	0.840	0.0326	
Enduit de plâtre	0.015	1.8	1300	0.936	0.0083	

**Tableau IV.3.** Composition du plancher (Sol)

Élément	Épaisseur [m]	$\lambda$ [KJ/m K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kg K]	R [m <sup>2</sup> K/KJ]	U (W/m <sup>2</sup> k)
Béton	0.050	6.12	2500	0.840	0.0081	0.638
EPS	0.050	0.144	25	1.380	0.3472	
Béton	0.150	6.12	2500	0.840	0.0245	
Mortier + sable	0.030	4.14	1900	0.950	0.0072	
carrelage	0.020	7.58	2200	0.936	0.0026	

Le tableau IV.4 résume les caractéristiques des fenêtres et portes utilisés dans la construction.

**Tableau IV.4.** Caractéristiques des portes et fenêtres

Matériau	Conductivité U (W/m <sup>2</sup> K)
Fenêtre	5,74
Porte	7,67

### IV.2.2 Conditions d'occupation

Pendant la journée, le bâtiment est occupé par quatre personnes effectuant des activités sédentaires, avec un taux métabolique constant de 1,2 MET, ce qui correspond à une production de chaleur de 126 W par personne.

L'indice de vêtements des occupants est de 0,5 en été et de 1 en hiver, et la vitesse de l'air est maintenue à 0,15 m/s pour assurer un confort optimal.

La charge thermique générée par l'équipement peut atteindre un maximum de 200 W, tandis que celle générée par l'éclairage peut atteindre 120 W.

### IV.3 Présentation de logiciel TRNSYS

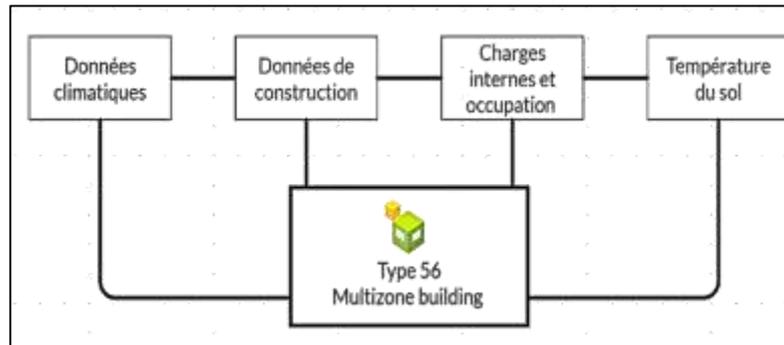
TRNSYS, un logiciel de simulation, définit un système comme étant un ensemble de composants interconnectés. Initialement conçu pour modéliser les systèmes de services du bâtiment, notamment le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC), ainsi que les systèmes solaires, mais désormais disponible pour la simulation de bâtiments complets. Le programme principal comprend une bibliothèque de plus de 200 composants prédéfinis (tels que des capteurs solaires, des radiateurs, des bâtiments multizones, etc...), chacun étant documenté dans un classeur interne. Dans le fichier d'entrée (appelé bureau TRNSYS), l'utilisateur spécifie les composants (TYPES) à utiliser pour simuler son système, en détaillant les connexions entre les composants pour définir l'ordre de calcul.

Les résultats peuvent être stockés en connectant la sortie de chaque composant à une "imprimante" virtuelle qui enregistre l'évolution des variables pendant la simulation. Chaque sortie d'un composant

doit être reliée à l'entrée d'un autre composant, et certains composants peuvent lire des fichiers externes pour fournir des données au système, comme des données météorologiques.

### IV.3.1 La démarche de simulation sous TRNSYS

TRNSYS utilise des méthodes de modélisation numérique reconnues pour simuler les processus, comme le montre le schéma ci-dessous (Figure IV.2) résumant la procédure de modélisation et de simulation du système étudié.



**Figure IV.2.** Paramètres d'entrée « Type 56 »  
[Source : auteurs]

La modélisation d'un système avec TRNSYS nécessite les étapes suivantes :

- **Première étape**
  - Sélectionner avec précision les modèles "Types" correspondant au type de module à simuler, au mode de fonctionnement visé et au type de résultats souhaités.
  - Assembler les Types sélectionnés pour constituer le modèle final, en veillant à bien connecter les entrées et sorties entre les différents composants.
  - Intégrer les données météorologiques correspondant à la région étudiée.
  - Dimensionner les systèmes (type de capteur solaire, échangeur de chaleur air-sol, etc.) et définir les paramètres physiques et thermiques associés.

- **Deuxième étape :**

La description détaillée du bâtiment étudié dans l'interface TRNBuild issue du modèle multizone (Type 56). Cette description consiste à :

- Etablir les zones thermiques du bâtiment, à dimensionner l'enveloppe et les fenêtres ;
- Définir la composition des parois (matériaux de construction) et le type de vitrage (simple ou double) ;
- Définir l'orientation du bâtiment ;
- Compléter les charges thermiques (appareils et occupations) ;
- Installer des systèmes de chauffage et de refroidissement ;
- Fixer les résultats de sortie (températures, humidité, besoins énergétiques, bilan général, etc.).

- **Troisième étape :**
  - Le couplage des systèmes énergétiques (le capteur solaire thermique et l'ECAS) avec le bâtiment « Type 56 ».
  - La configuration des systèmes de contrôles et de régulation entre les systèmes énergétiques (Types) et le bâtiment « Type 56 ».
- **Quatrième étape :**
  - Le lancement de simulation avec un pas de temps précis.
  - La validation des résultats de simulation avec ceux de l'expérimental.
  - La lecture des résultats de la simulation.
  - L'exploitation des résultats (importation des données).

## IV.4 L'interface TRN BUILD

TRNSYS permet de modéliser le comportement thermique d'un bâtiment multizonal à travers le type 56 inclus dans la bibliothèque. Le type 56 requiert en entrée la description physique du bâtiment (la composition des murs, leurs orientations respectives, les surfaces vitrées et les types de vitrage utilisés) ainsi que les gains internes et les débits d'échange d'air et détermine en sortie un grand nombre de variables dont la température d'air et opérative, l'humidité relative, les quantités de chaleur sensibles et latentes. TRNSYS propose un outil spécial 'TRNBUILD' qui permet de faciliter la saisie d'un bâtiment afin de créer les fichiers d'entrée nécessaires pour le type 56. Le type 56 est généralement utilisé avec un pas de temps d'une heure, mais peut être utilisé avec des pas de temps plus petits (une demi-heure ou un quart d'heure). Les descriptions du modèle physique du type 56 ainsi que de ses caractéristiques sont disponibles dans le manuel de TRNSYS16 [2].

### IV.4.1 Les étapes de réalisation du bâtiment

Dans le cadre de l'étude du modèle, on définit les orientations et les pièces constituant le modèle étudié qu'on appelle les zones (Figure IV.3) (voir annexe 7).

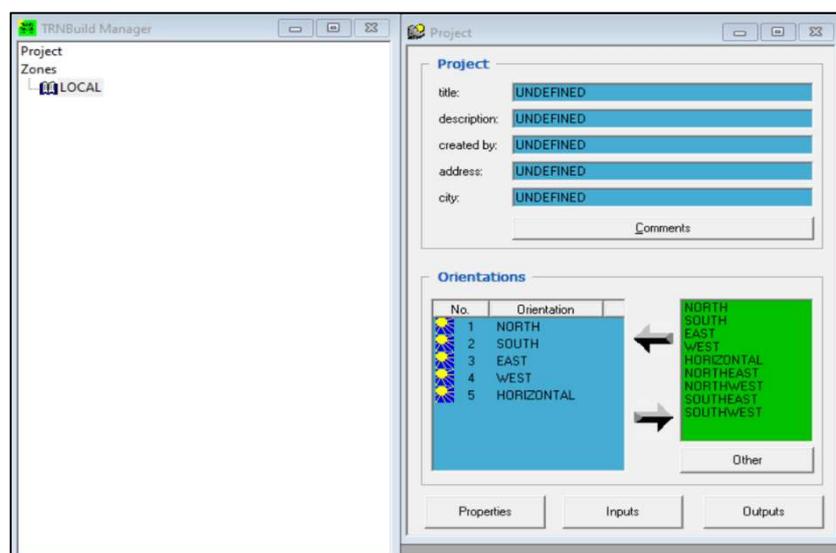


Figure IV.3. Définitions des orientations et des zones.

Pour chaque élément (couche) composant une paroi (mur, plancher, toit, etc.), on spécifie ses propriétés thermiques, à savoir sa conductivité thermique, sa capacité thermique et sa masse volumique. L'unité utilisée par TRNSYS pour ces paramètres est le kJ/h (figure IV.4) (voir annexe 8).

Layer Type Manager

layer type: **BETON**

Massive Layer  Massless Layer  Active Layer  Chilled Ceiling

**Massive Layer**

conductivity: **6.12** kJ / h m K

capacity: **0.84** kJ / kg K

density: **2500** kg / m<sup>3</sup>

**Figure IV.4.** Définition des paramètres thermo physique des couches

Pour chaque paroi, il faut spécifier les différentes couches de matériaux qui la compose, en précisant pour chacune son épaisseur, ses propriétés thermo physiques (conductivité thermique, capacité thermique, masse volumique) et sa position, de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment (Figure IV.5) (voir annexe 9).

Wall Type Manager

wall type: **MURNDRD**

**front / inside**

No.	Layer	Thickness	Type
1	PLATRE	0.015	massive
2	BRIQUE	0.100	massive
3	AIR	0.050	massive
4	BRIQUE	0.100	massive
5	CIMENT	0.025	massive

**back**

total thickness: **0.290** m

u - value: **1.548** W/m<sup>2</sup> K for reference only  
(incl. alpha\_i=7.7 W/m<sup>2</sup> K and alpha\_o=25 W/m<sup>2</sup> K !)

**Solar Absorptance of Wall**

front: **0.3**

back: **0.35**

**Convective Heat Transfer Coefficient of Wall**

**Front**

userdefined  internal calculation

**32.7** kJ/h m<sup>2</sup> K

**Back**

userdefined  internal calculation

**60** kJ/h m<sup>2</sup> K

OK Cancel Save to user library **RDCN**

**Figure IV.5.** Définition du mur

Pour chaque fenêtre, il faut spécifier le type de vitrage, les coefficients d'échange par convection côté intérieur et côté extérieur, ainsi que la transmissibilité du vitrage et des menuiseries, comme illustré dans la figure ci-dessous (Figure IV.6) (voir annexe 10).

The screenshot shows the 'Window Type Manager' dialog box. The 'window type' is 'FENETRE'. The 'Glazing' section has 'ID number' 1001, 'slope of window' 90 degree, 'width' and 'height' in meters, 'u - value' 6.74 W/m<sup>2</sup> K, 'g - value' 0.87 %/100, and 'ID spacer' 0. The 'Frame' section has 'area frame/window' 0.15 %/100, 'solar absorptance' 0.6, and 'u - value (1/R)' 8.17 kJ/h m<sup>2</sup> K. The 'Optional Properties of Shading Devices' section has 'internal device' and 'external device' thermal resistance both at 0 h m<sup>2</sup> K/kJ, and 'Reflection Coefficient of Internal Device' towards window and zone both at 0.5 %/100. The 'Convective Heat Transfer Coefficient of Window (glazing + frame)' section has 'Front (inside)' and 'Back (outside)' coefficients both at 32.7 and 50 kJ/h m<sup>2</sup> K respectively. Buttons for 'OK', 'Cancel', 'Save to user library', and 'RDCN' are at the bottom.

Figure IV.6. Définition des fenêtres.

Pour chaque pièce du modèle, on spécifie sa superficie et son volume. Pour chaque paroi, on indique son type, son orientation (nord, sud, etc.), sa catégorie (extérieure, adjacente, etc.). On définit également les fenêtres et les portes pour chaque mur qui en comporte, comme illustré dans la figure IV.7 (voir annexe 11).

Les catégories des parois sont les suivantes :

**EXTERNAL** : pour les parois extérieures il faut définir leurs orientations parmi les orientations précédemment définies « view factor to sky » qui est égal à 1 pour une toiture terrasse, 0.5 pour un mur vertical, 0 pour une face horizontale orientée vers le bas.

**ADJACENT** : pour les parois de la zone en contact avec une autre zone. Il faut donc préciser la zone avec laquelle elle est en contact une fois que cette zone est définie et le sens de la paroi

**BOUNDARY** : pour les parois de la zone en contact avec une condition limite (par exemple le sol). Dans ce cas, il faut préciser la température de la condition limite.

**INTERNAL** : pour les parois internes à la zone. Ces parois servent surtout à faire augmenter l'inertie de la zone.



Figure IV.7. Définition des parois constituant une zone

Pour évaluer les besoins énergétiques d'un bâtiment dans un outil de simulation thermique dynamique comme TRNSYS, il faut spécifier pour chaque zone (pièce) la température de consigne à laquelle on souhaite activer le chauffage ou la climatisation. La réglementation thermique des bâtiments d'habitation [5] recommande les valeurs suivantes :

- Chauffage : activation du chauffage pour des températures intérieures inférieures à 20°C.
- Climatisation : activation de la climatisation pour des températures intérieures supérieures à 27°C.

Afin de spécifier le type de calcul à réaliser et les résultats attendus, on configure les sorties (outputs) qui représentent la phase finale de la description du bâtiment. Cela implique de choisir une zone ou un groupe de zones et de sélectionner le numéro de sortie correspondant à la fonctionnalité souhaitée. La figure IV.8 (voir annexe 12), montre comment définir les outputs pour calculer les besoins énergétiques pour un groupe de zones.

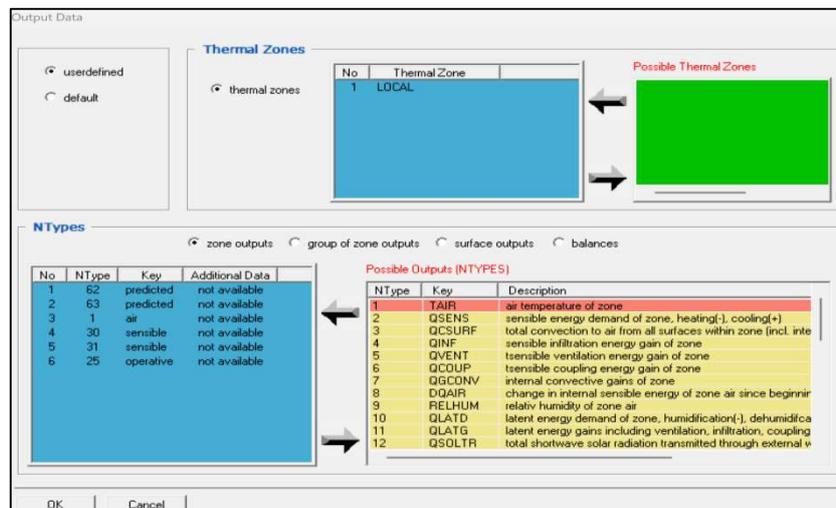


Figure IV.8. Définitions des outputs pour le calcul des besoins énergétiques.

## IV.5 Simulation studio

Simulation Studio est une plateforme qui favorise le développement de nouveaux modèles numériques et la réalisation d'études dynamiques (Figure IV.9).

Cet outil simplifie l'intégration de toutes les caractéristiques des projets de construction, telles que l'emplacement, les matériaux, l'architecture, ainsi que les systèmes de chauffage, de refroidissement et de climatisation. Cette approche permet de simuler des projets de manière dynamique, évaluant la consommation énergétique globale, les températures de chaque espace et identifiant les éventuels problèmes de surchauffe.

TRNSYS ou tout autre logiciel se caractérise par fonctions qui peuvent se regrouper en trois domaines [3].

### Entrée

En ce qui concerne les données à saisir et à enregistrer dans des bibliothèques pour une utilisation par le concepteur, celles-ci englobent divers aspects tels que l'environnement physique (climat, site), la structure du bâtiment (enveloppe), les sources internes de chaleur (occupants, éclairage) et les équipements (ventilation, chauffage, climatisation).

### Traitement des données

Le travail du logiciel consiste à structurer les données en fonction d'un « modèle de représentation du bâtiment » et de « modèles physico-mathématiques » des phénomènes physiques retenus.

### Sorties

Les résultats potentiels fournis par le logiciel à la fin d'une exécution comprennent les divers phénomènes que le modèle de simulation thermique doit prendre en considération :

- Le transfert de chaleur par conduction à travers l'enveloppe et les effets de stockage calorifique dans la masse du bâtiment.
- Les apports de chaleur provenant des occupants, des appareils et de l'éclairage électrique.
- L'ombrage des parois opaques et transparentes.
- Les effets des radiations solaires de courte longueur d'onde et les radiations reçues par les surfaces exposées et internes.
- Les échanges de radiations de longueur d'onde entre les surfaces externes, le ciel et l'environnement environnant.
- Les effets de l'humidité.

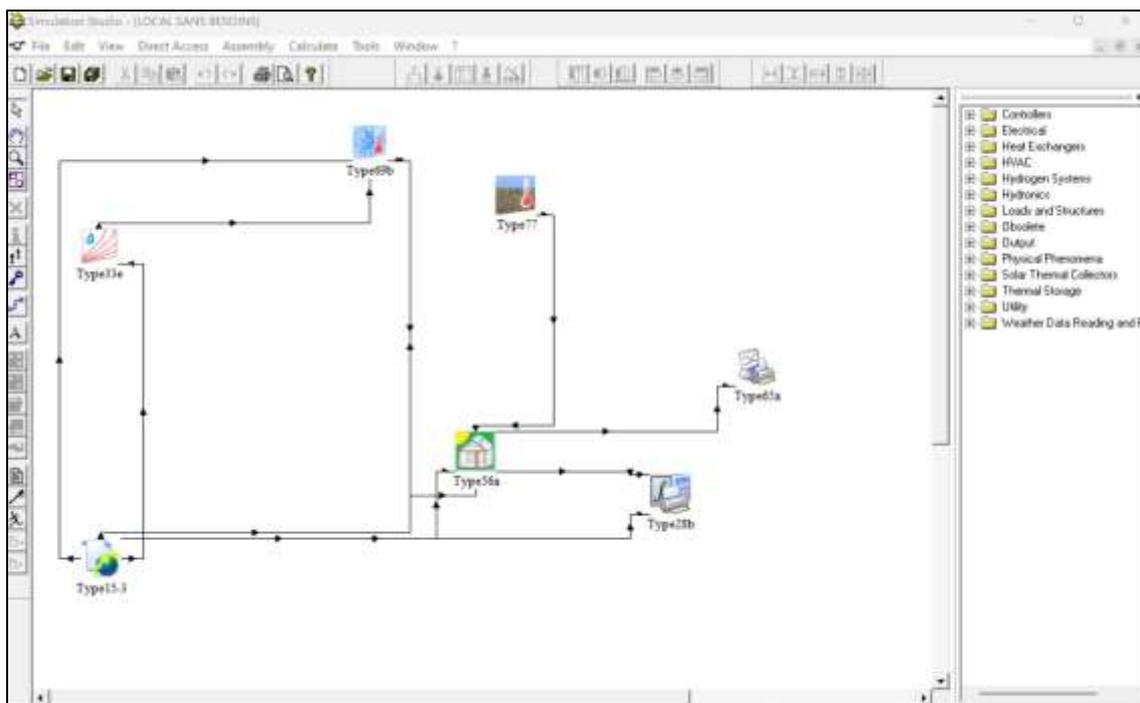


Figure IV.9. Interface TRNstudio avec schéma pour la simulation

### IV.5.1 Types

Les différents éléments du système étudié, tels qu'un capteur solaire, un tuyau, une pompe, un réservoir ou une vanne, sont représentés dans TRNSYS par des composants appelés "Types". Chaque Type possède des fonctions prédéfinies permettant de modéliser divers aspects des systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation, et autres applications énergétiques. Par exemple, pour une étude thermique complète, plusieurs Types sont nécessaires pour capturer les dynamiques thermiques du système. Une illustration de la création d'un réseau de Types est proposée dans la figure IV.10.

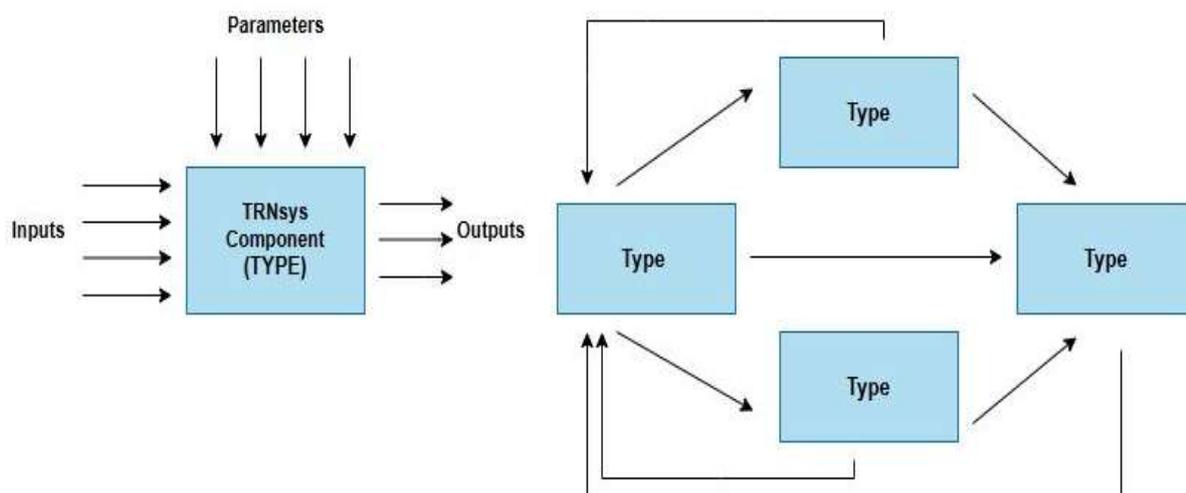


Figure IV.10. Topologie des Types sur TRNSYS  
[Source : auteurs]

Les Types suivants ont été utilisés dans notre modélisation [2] :

- **Type 56**

Ce composant modélise le comportement thermique d'un bâtiment comportant jusqu'à 25 zones thermiques. Il lit la description du bâtiment à partir d'un ensemble de fichiers externes avec les extensions \*.bui, \*.bld et \*.trn. Cette instance de Type56 génère son propre ensemble de fichiers de sortie récapitulatifs mensuels et horaires.

Le TYPE 56 est relié à 4 composants pour tenir compte des conditions climatiques dans lesquelles le bâtiment a été modélisée.

- **Type 77**

Cette sou routine modélise la distribution verticale de la température du sol en fonction de la température moyenne annuelle de la surface du sol, de l'amplitude annuelle de la température de la surface du sol, de la différence de temps entre le début de l'année civile et l'occurrence de la température minimale de surface, ainsi que de la diffusivité thermique du sol.

Ces valeurs peuvent être trouvées dans diverses sources, y compris les manuels ASHRAE (se référer à la température du sol).

- **Type 69b**

Ce composant détermine une température effective du ciel, utilisée pour calculer l'échange de rayonnement à longues ondes entre une surface externe arbitraire et l'atmosphère.

La température effective du ciel est toujours inférieure à la température ambiante actuelle. Par exemple, un ciel dégagé pendant une nuit claire se voit attribuer une température effective du ciel basse pour tenir compte des pertes radiatives supplémentaires d'une surface exposée au ciel. Dans cette version spécifique de Type69, la nébulosité du ciel est calculée en fonction des températures de l'air sec et de point de rosée fournies par l'utilisateur.

- **Type 33e**

Ce composant prend en entrée la température de l'air sec et l'humidité relative de l'air humide, et utilise la routine psychrométrique de TRNSYS pour renvoyer les propriétés correspondantes de l'air humide suivantes : température de l'air sec, température du point de rosée, température du thermomètre mouillé, humidité relative, rapport d'humidité absolue, et enthalpie.

- **Type 65a**

Le composant graphique en ligne est utilisé pour afficher les variables sélectionnées du système pendant la progression de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations précieuses sur les variables et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas comme souhaité. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de graphique séparée à l'écran.

De plus, les données envoyées au traceur en ligne sont automatiquement imprimées dans un fichier externe défini par l'utilisateur, avec des descripteurs d'unité fournis par TRNSYS.

- **Type 28b**

Peut être utilisé pour générer des résumés quotidiens, hebdomadaires, mensuels ou saisonniers d'informations calculées dans une simulation.

Le type 28 intègre ses entrées sur l'intervalle de temps défini pour le résumé, effectue des opérations arithmétiques spécifiées par l'utilisateur sur les intégrales, et imprime les résultats. Les résultats sont ensuite enregistrés dans un fichier externe.

- **Type 15-3**

Ce composant est conçu pour lire des données à intervalles réguliers à partir d'un fichier météorologique externe, interpoler ces données (y compris le rayonnement solaire sur les surfaces inclinées) pour des pas de temps inférieurs à une heure, et les rendre disponibles à d'autres composants de TRNSYS. En outre, ce modèle calcule plusieurs paramètres utiles, tels que la température de l'eau dans les canalisations principales, la température effective du ciel, ainsi que les fonctions de forçage pour les saisons de chauffage et de refroidissement.

## IV.6 Avantages et inconvénients de TRNSYS

TRNSYS offre de nombreux avantages, parmi lesquels : [4]

- Une abondance de documentation et de retours d'expérience disponibles.
- La possibilité de personnaliser son modèle en modifiant le code source.
- L'intégration aisée avec d'autres logiciels tels que Matlab, Excel et SketchUp.
- Une grande flexibilité pour définir la période de simulation, en choisissant le pas de temps initial et final.
- La prise en compte de l'inertie du bâtiment et du stockage de chaleur associé.
- Une facilité de définition du bâtiment grâce à TRNBuild, permettant des ajustements rapides des paramètres.
- L'accès à une vaste bibliothèque de matériaux et la possibilité de modifier ou ajouter des composants absents de la librairie de base.

Bien que TRNSYS soit un outil puissant pour la simulation thermique des bâtiments, il présente quelques limites à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats :

- L'utilisateur doit fournir l'ensemble des données définissant les systèmes du bâtiment, ce qui peut être fastidieux et source d'erreurs.
- Le logiciel ne vérifie pas automatiquement les erreurs potentielles dans les surfaces et volumes saisis par l'utilisateur.

Il est donc important de garder à l'esprit ces limitations lors de la modélisation et de l'analyse des résultats de simulation avec TRNSYS, afin d'en tirer des conclusions pertinentes et représentatives du comportement réel du bâtiment.

## IV.7 Simulations réalisées

Le bâtiment a, tout d'abord, été simulé en évolution libre (free floating). Quelques stratégies passives ont ensuite été appliquées afin d'évaluer le potentiel de chaque stratégie et de comparer les résultats obtenus à ceux présentés en chapitre 3.

Les stratégies étudiées dans ce chapitre sont les suivantes :

- L'effet de la ventilation naturelle
- L'effet de la protection solaire des fenêtres

- L'effet de l'inertie thermique
- L'effet de l'isolation thermique
- L'effet du chauffage solaire passif

Le confort a été évalué par le calcul de l'indice PMV (Predicted Mean Vote). Nous avons alors calculé le nombre d'heures (selon la saison de chauffage ou de rafraîchissement) où le PMV est compris entre -1 et +1 (légèrement frais à légèrement chaud).

## IV.8 Résultats

### IV.8.1 Local en évolution libre

Le tableau IV.5 synthétise les pourcentages de temps de confort, évalués par le ratio entre le nombre d'heures de confort et le nombre d'heures total dans la saison, pour chaque saison et pour chaque ville représentative.

**Tableau IV.5.** Pourcentages de temps de confort dans chaque ville durant les deux saisons.

Ville	Eté		Hiver	
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage
<b>Alger</b>	134	09.01	2821	64.94
<b>Constantine</b>	1429	48.80	1771	30.37
<b>Relizane</b>	448	20.29	2131	49.06
<b>Sétif</b>	1348	61.05	1307	22.41
<b>Bechar</b>	541	14.73	1003	27.68
<b>Tamanrasset</b>	457	10.04	1037	48.01

On remarque que la ville de Sétif est celle qui présente le pourcentage de confort d'été le plus élevé alors qu'Alger présente le pourcentage le plus faible. Ceci s'explique par les taux d'humidités importants qui caractérisent le climat de la zone A (variant de 68% à 71%).

Par contre l'hiver, c'est la ville d'Alger qui semble être la plus confortable et Sétif la moins confortable. Alger profite d'un climat méditerranéen doux et de l'influence modératrice de la mer, ce qui entraîne des températures plus clémentes. En revanche, Sétif, située à une altitude plus élevée, subit des hivers plus rigoureux avec des températures plus basses, expliquant ainsi son faible pourcentage de confort durant cette saison.

### IV.8.2 Effet de la ventilation naturelle

Dans cette étude nous avons cherché à connaître l'effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique dans les différentes villes représentatives. Afin de favoriser une bonne circulation de l'air et créer une ventilation transversale, nous avons installé deux fenêtres supplémentaires du côté nord. Nous avons également conçu des scénarios de ventilation spécifiques pour chaque ville, résumés dans le tableau IV.6.

**Tableau IV.6.** Scénarios d'ouverture des fenêtres par ville

Villes	Ouverture	Fermeture
Alger	19h-7h	7h-19h
Constantine	18h-8h	8h-18h
Relizane	17h-6h	6h-17h
Sétif	18h-7h	7h-18h
Bechar	20h-6h	6h-20h
Tamanrasset	20h-6h	6h-20h

Le tableau IV.7 présente les résultats de la simulation du local avant et après l'introduction des différents scénarios d'ouverture des fenêtres.

**Tableau IV.7.** Temps de confort sans et avec la ventilation naturelle dans les différentes villes.

Ville	Bâtiment initial		Avec VN		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
Alger	134	09.01	313	21.03	12.02
Constantine	1429	48.80	1815	61.99	13.18
Relizane	448	20.29	486	22.00	1.72
Sétif	1348	61.05	1586	71.83	10.78
Bechar	541	14.73	611	16.64	1.9
Tamanrasset	457	10.04	627	14.28	3.8

Le taux d'amélioration du confort a été calculé par l'expression :

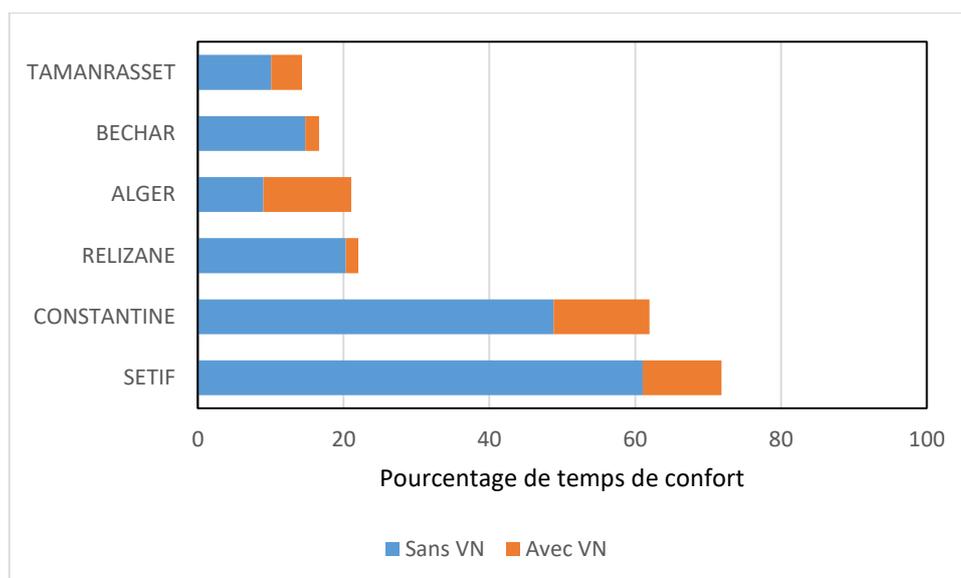
$$T = \frac{\text{nombre d'heures avec stratégie passive} - \text{nombre d'heures sans stratégie}}{\text{nombre d'heures de la période simulée}}$$

Ce tableau indique clairement une amélioration du pourcentage de confort dans toutes les villes lorsque la stratégie de ventilation naturelle est mise en œuvre.

La ventilation naturelle est très efficace à Constantine, le nombre d'heures de confort passe de 1429 heure à 1815 ce qui représente une augmentation du temps de confort remarquable 13.18%. Elle est suivie de Alger puis Sétif et Tamanrasset.

Cependant, Bechar et Relizane semblent être les villes qui présentent le potentiel de ventilation naturelle nocturne le plus faible avec un pourcentage d'amélioration de 1.9 et 1.72% respectivement.

Pour mieux voir l'effet de la ventilation dans chaque ville, nous avons présenté les pourcentages de temps de confort sans et avec la ventilation naturelle nocturne (figure IV.11).



**Figure IV.11.** Pourcentage de temps de Confort avant et après mise en œuvre de la ventilation naturelle nocturne.

### IV.8.3 Effet de la protection solaire des fenêtres

Dans le cadre de cette étude, nous avons intégré deux types de protections solaires, les dispositifs extérieurs et intérieurs, avec des coefficients d'ombrage de 0,6 et 0,5 respectivement, pour mesurer leur influence sur le confort thermique des espaces intérieurs. Les auvents, qui bloquent environ 60 % du rayonnement direct du soleil, se révèlent particulièrement efficaces durant la saison estivale, une affirmation soutenue par le guide « Energy Saver » du Département de l'énergie des États-Unis [5]. Par ailleurs, les rideaux internes, bien qu'ils offrent une performance moindre en réduisant la transmission solaire de 50 %, jouent un rôle essentiel dans la modulation de l'environnement thermique interne, ce qui est appuyé par des études publiées sur des plateformes spécialisées comme Ecohome [6]. L'adoption de ces coefficients d'ombrage est ainsi justifiée par leur impact significatif sur l'amélioration du confort thermique à l'intérieur des bâtiments étudiés.

L'intégration des protections solaires que nous avons choisies a permis une très légère amélioration du confort d'après les résultats présentés dans le tableau IV.8.

**Tableau IV.8.** Potentiel des protections solaires dans les différentes villes.

Ville	Bâtiment initial		Avec Protections Solaires		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
<b>Alger</b>	134	09.01	167	11.22	2.22
<b>Constantine</b>	1429	48.80	1497	50.51	2.32
<b>Relizane</b>	448	20.29	465	21.06	0.77
<b>Sétif</b>	1348	61.05	1396	63.22	2.17
<b>Bechar</b>	541	14.73	565	15.39	0.65
<b>Tamanrasset</b>	457	10.04	469	10.68	0.64

Le tableau montre l'impact des protections solaires sur le confort thermique dans divers bâtiments à travers l'Algérie. Bien que les protections solaires aient un effet positif sur le confort thermique, l'ampleur de cette amélioration reste généralement faible. Les taux d'amélioration observés varient entre 0.64% à Tamanrasset jusqu'à 2.32% environ à Constantine.

Ces petits gains contribuent à des économies d'énergie significatives à long terme.

L'effet des protections solaires sur l'amélioration du temps de confort est mieux visualisé sur le graphique de la figure IV.12.

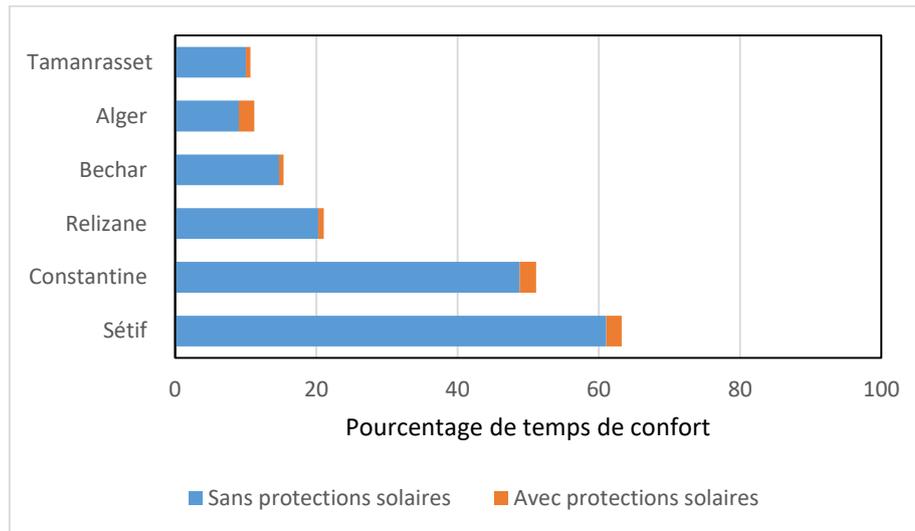


Figure IV.12. Pourcentage de temps de Confort avant et après mise en œuvre des protections solaires.

On voit clairement que l'amélioration du confort n'est pas très significative.

#### IV.8.4 Effet de l'inertie thermique

Pour étudier l'impact de l'inertie thermique sur le confort du local, nous avons procédé à une modification de la composition de ses parois, nous avons choisi de les remplacer par des parois en pierre. Ce matériau caractérisé par sa densité et sa capacité thermique élevées, offre une inertie thermique importante susceptible de retarder les pics de chaleur ou de froid. Les caractéristiques thermo physiques de ce matériau sont présentées dans le tableau IV.9 [7].

L'épaisseur adoptée pour chaque ville a été optimisée, pour le confort d'été, après plusieurs simulations.

Tableau IV.9. Les caractéristiques du matériau

Villes	$\rho$ [ kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [ kJ/hmk ]	Cp [ kJ/kg k ]	e [ cm ]
Alger	1700	3.6	0.936	20
Constantine	1700	3.6	0.936	20
Relizane	1700	3.6	0.936	30
Sétif	1700	3.6	0.936	20
Bechar	1700	3.6	0.936	15
Tamanrasset	1700	3.6	0.936	20

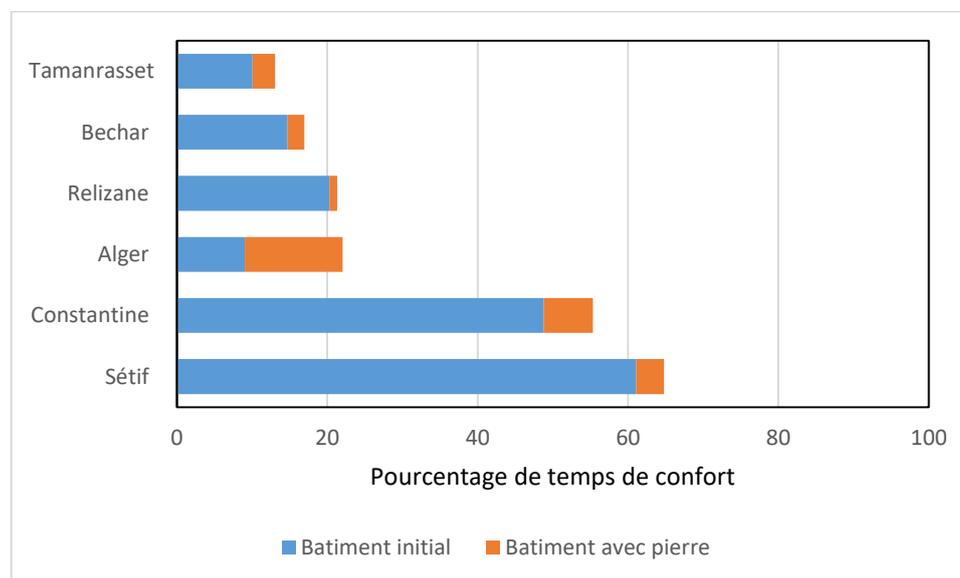
Le tableau IV.10 ci-dessous présente les résultats de simulations pour les différentes villes, comparant les performances avant et après l'augmentation de l'inertie des parois du local.

**Tableau IV.10.** Potentiel de l'inertie thermique pour le confort d'été.

Ville	Bâtiment initial		Bâtiment en pierre		Taux d'amélioration du confort T (%)
	Nombre d'heures	Pourcentage	Nombre d'heures	Pourcentage	
Alger	134	09.01	328	22.04	13.04
Constantine	1429	48.80	1620	55.32	6.52
Relizane	448	20.29	470	21.28	1.00
Sétif	1348	61.05	1431	64.80	3.76
Bechar	541	14.73	623	16.96	2.23
Tamanrasset	457	10.04	573	13.09	3.01

Les résultats mettent en évidence des variations dans l'efficacité de l'augmentation de l'inertie thermique en fonction des villes. Alger offre le meilleur potentiel suivi de Constantine. En revanche, les autres villes montrent des résultats plus modestes en terme d'amélioration du confort. Notons ici que les parois (horizontales surtout) du bâtiment initial présentent déjà une très bonne inertie, c'est probablement pour cette raison que l'amélioration n'est pas très significative.

Les améliorations résultantes sont mieux illustrées sur la figure IV.13.



**Figure IV.13.** Effet de l'augmentation de l'inertie thermique sur le confort thermique

#### IV.8.5 L'effet de chauffage solaire passif

Pour évaluer l'impact du chauffage solaire passif sur le confort thermique du local en hiver, nous avons progressivement augmenté le ratio entre la surface des fenêtres et la surface des murs de notre local d'étude, passant d'un ratio initial de 25% à 50%, puis à 75%, et enfin à 100%. Après une analyse

approfondie des performances, nous avons remarqué que le ratio de 75% offrait les résultats les plus satisfaisants en termes d'efficacité énergétique et de confort thermique.

Par conséquent, nous avons choisi de nous concentrer uniquement sur les résultats obtenus avec un ratio de 75%, correspondant à une surface vitrée de 4.5 m<sup>2</sup>. De plus, ces fenêtres ont été équipées des mêmes dispositifs de protection solaire qui ont été précédemment étudiés et intégrés (un coefficient d'ombrage extérieur de 0.6 et intérieur de 0.5) pour améliorer la performance globale du système.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV.11.

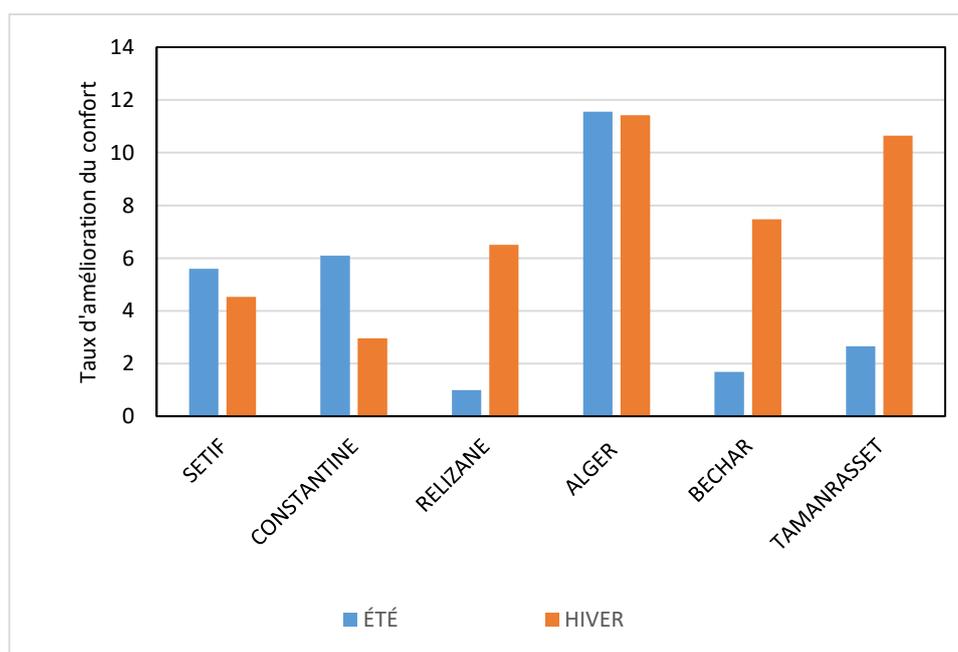
**Tableau IV.11.** Effet de l'augmentation de la surface de vitrages sur le confort

Villes	Confort d'été					Confort d'hiver				
	Bâtiment initial		Solaire passif		Taux	Bâtiment initial		Solaire passif		Taux
	Heures	%	Heures	%		Heures	%	Heures	%	
<b>Alger</b>	134	9.01	306	20.56	11.56	2821	64.94	3317	76.3	11.42
<b>Constantine</b>	1429	48.80	1608	54.91	6.11	1771	30.37	1944	33.33	2.96
<b>Relizane</b>	448	20.29	470	21.28	1.00	2131	49.06	2414	55.57	6.51
<b>Sétif</b>	1348	61.05	1473	66.25	5.66	1307	22.41	1571	26.94	4.53
<b>Bechar</b>	541	14.73	603	16.42	1.69	1003	27.68	1274	35.15	7.48
<b>Tamanrasset</b>	441	10.04	558	13.38	2.66	1037	48.01	1267	58.65	10.65

Les résultats démontrent que l'adoption de stratégies de chauffage solaire en hiver a permis des améliorations du confort thermique dans toutes les villes étudiées. Les taux d'amélioration observés sont variables, s'échelonnant de 3% à Constantine jusqu'à 11.5% environ à Alger.

En été, les résultats révèlent que l'augmentation de la surface de vitrage n'a pas de conséquences négatives sur le confort d'été si les fenêtres sont munies de protections solaires. Bien au contraire le confort se trouve également légèrement amélioré surtout à Alger qui présente le meilleur taux d'amélioration.

La figure IV.14 offre une représentation plus claire des améliorations apportées par l'augmentation de la surface des fenêtres.



**Figure IV.14.** Taux d'amélioration du confort après l'augmentation de la surface des fenêtres munies de protections solaires.

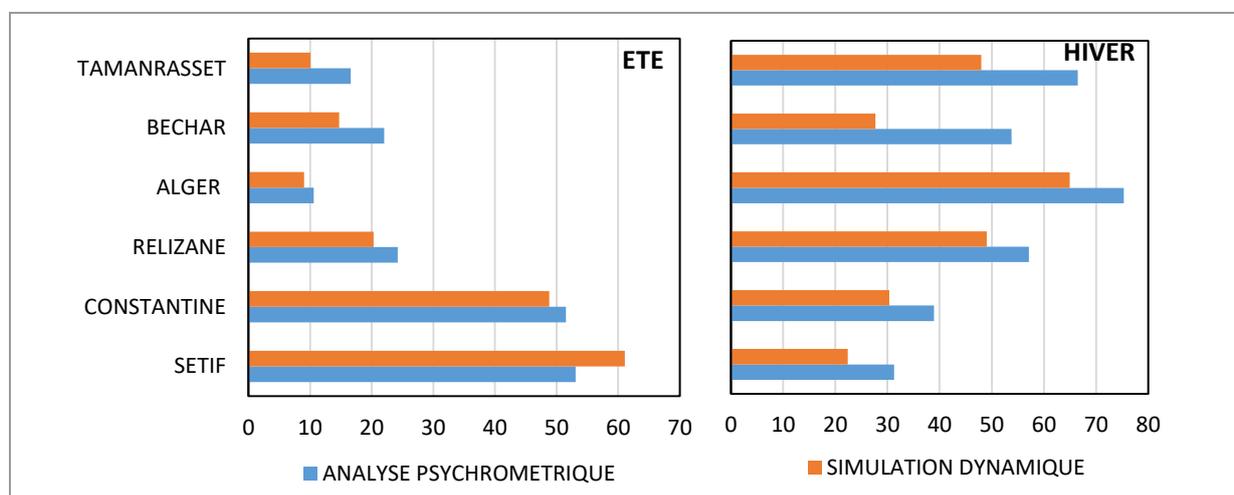
## IV.9 Comparaison entre les résultats des deux approches : Analyse psychrométrique et modélisation numérique

Dans cette étude, nous allons comparer les résultats des potentiels de confort obtenus en utilisant les deux approches utilisées précédemment. Les comparaisons se feront pour les différents cas suivants :

- Le confort dans le local sans aucune stratégie passive ;
- Le potentiel de confort de chaque stratégie passive et pour chaque période (de chauffage ou de rafraîchissement) ;
- Le potentiel de confort annuel en intégrant toutes les stratégies efficaces.

### IV.9.1 Local en évolution libre

Les résultats obtenus par les deux approches sont représentés dans la figure IV.15.



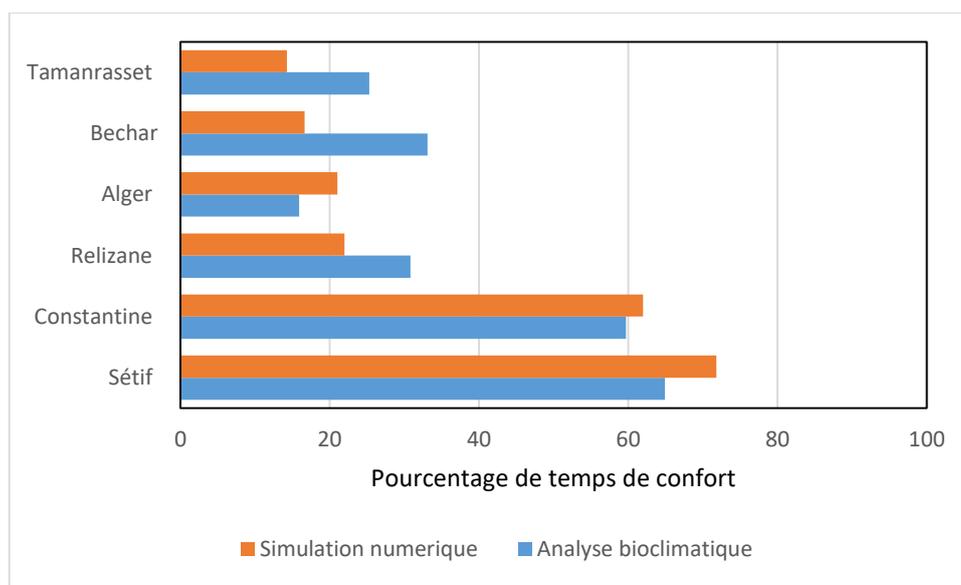
**Figure IV.15.** Pourcentage de temps de confort obtenu sans aucune stratégie dans chaque ville par les deux approches.

On constate que les pourcentages de temps de confort obtenus par l'analyse psychrométrique sont légèrement plus grands surtout en hiver où l'écart entre les deux approches est sensiblement plus important, les différences sont plus marquées dans les climats chauds (Tamanrasset et Bechar).

### IV.9.2 Potentiel de la ventilation naturelle

La figure IV.16 compare les pourcentages de confort thermique obtenus à partir des deux approches utilisées pour les six villes algériennes choisies dans l'étude. Les résultats montrent de faibles écarts entre les deux méthodes sauf pour les deux villes Bechar et Tamanrasset dont le climat est chaud.

Plusieurs auteurs attestent que ces méthodes basées sur des modèles de confort statiques ne sont pas très adaptés aux bâtiments situés dans des climats chauds [8-11].

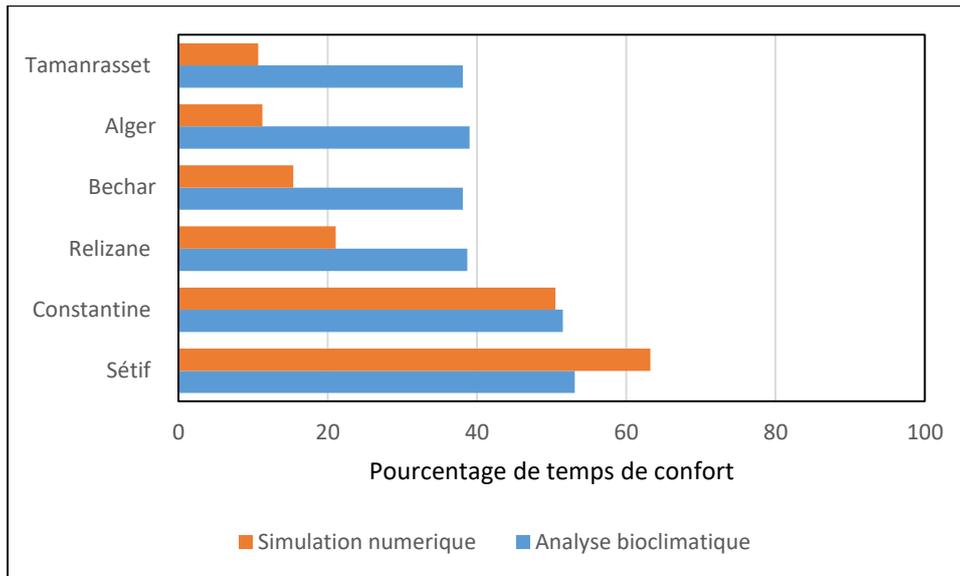


**Figure IV.16.** Pourcentage de temps de confort après la mise en œuvre de la ventilation naturelle dans chaque ville par les deux approches.

Les villes d'Alger, Constantine et Sétif montrent des pourcentages de confort assez proches entre les deux approches avec des valeurs sensiblement plus élevées en utilisant la simulation numérique. Pour Relizane, Béchar et Tamanrasset, les pourcentages de confort sont plus élevés avec l'analyse bioclimatique.

### IV.9.3 Protection solaire des fenêtres

Le pourcentage d'heures de confort calculé, dans le cas de l'utilisation des protections solaires, par les deux approches est présenté dans la figure IV.17.

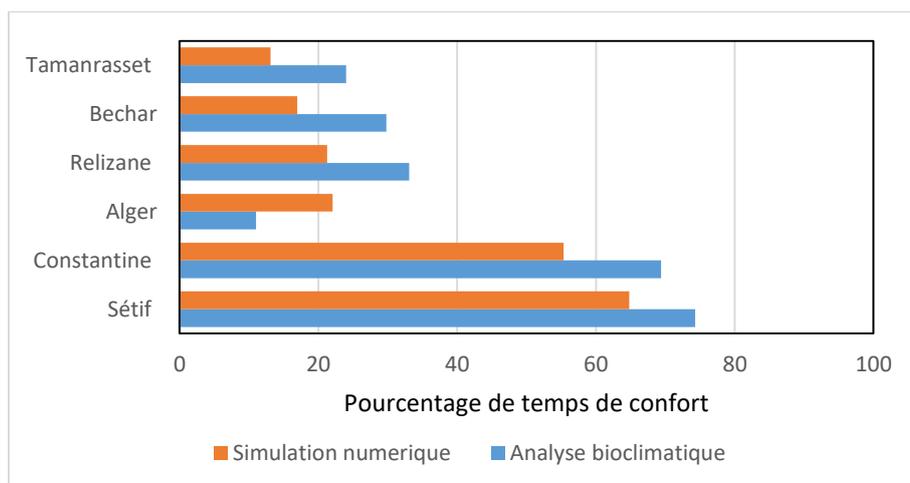


**Figure IV.17.** Pourcentage de temps de confort après la mise en œuvre des protections solaires dans chaque ville par les deux approches.

La protection solaire appliquée au local est efficace dans la ville de Sétif, selon la simulation numérique en utilisant des coefficients d'ombrage de 0.5 à l'intérieur et 0.6 à l'extérieur. Cependant, l'analyse bioclimatique indique qu'un meilleur confort thermique peut être atteint dans les autres villes étudiées.

#### IV.9.4 Inertie thermique

D'après la figure IV.18, qui représente le potentiel de confort de l'inertie thermique dans chaque ville, les résultats de l'analyse psychrométrique sont surestimés pour toutes les villes à l'exception de la ville d'Alger où la simulation numérique donne la valeur la plus importante.

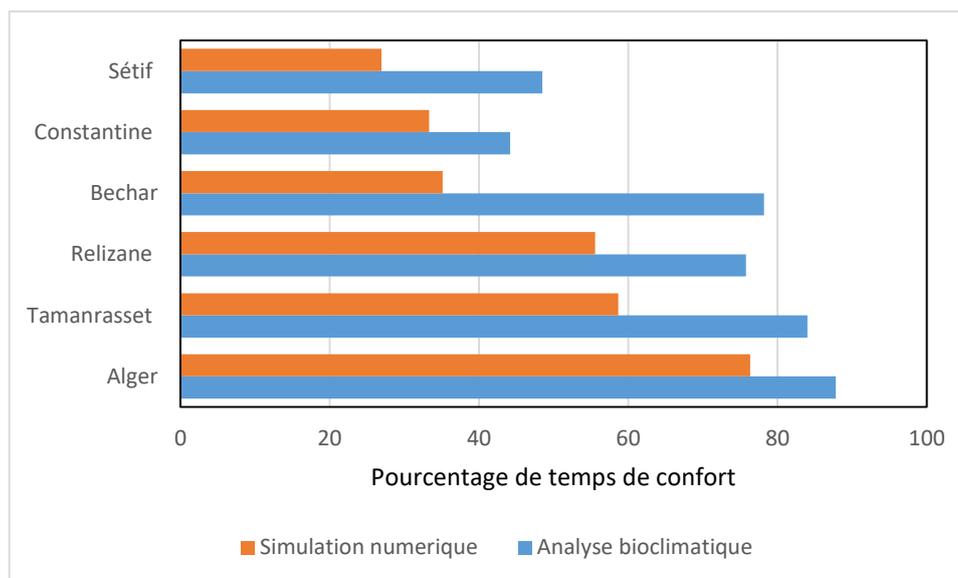


**Figure IV.18.** Pourcentage de temps de confort après l'augmentation de l'inertie thermique dans chaque ville par les deux approches.

La différence vient probablement du fait que le mur choisi dans la simulation pour caractériser l'inertie est le même pour toutes les villes alors que l'analyse psychrométrique donne les résultats en considérant l'inertie optimale pour le climat considéré.

#### IV.9.5 Chauffage solaire passif

Les potentiels de confort du solaire passif, évalués par les deux méthodes, sont montrés sur la figure IV.19.



**Figure IV.19.** Pourcentage de temps de confort après l'intégration du chauffage solaire passif dans les villes par les deux approches.

Les résultats démontrent que la stratégie de chauffage solaire adoptée par l'analyse psychrométrique offre des taux de confort thermique supérieurs à ceux obtenus par la simulation dynamique pour la période hivernale.

Pour Alger, l'analyse bioclimatique indique un taux de confort de 87,8% contre seulement 76,35% avec la simulation dynamique, soit un écart de plus de 11 points. À Relizane et Bechar, les écarts sont encore plus significatifs, avec respectivement 20 et 43 points. Cet écart est dû aux gains de chaleur que l'analyse psychrométrique utilise en totalité (sans pertes) puisqu'elle associe les gains solaires passifs à la grande inertie du bâtiment. Par contre, en simulation dynamique, les pertes de chaleur dépendent de la structure choisie du bâtiment.

#### IV.9.6 Comparaison entre les temps de confort annuel

Afin d'analyser la précision des deux méthodes utilisées, le confort annuel a été évalué. Le tableau IV.12 récapitule les heures de confort sur toute l'année, soit 8760 heures en combinant toutes les stratégies passives étudiées dans ce chapitre.

**Tableau IV.12.** Effet de toutes les stratégies sur le temps de confort annuel estimé par les deux approches

Ville	Analyse Bioclimatique	Simulation numérique
-------	-----------------------	----------------------

	Heures	%	Heures	%
<b>Alger</b>	5482	67.1	6761	77.18
<b>Constantine</b>	5539	63.2	3644	41.6
<b>Relizane</b>	5355	61.1	5028	57.4
<b>Sétif</b>	4423	50.5	3655	41.7
<b>Bechar</b>	5212	59.5	3246	47.1
<b>Tamanrasset</b>	4946	56.5	3984	45.5

On remarque que les pourcentages de confort annuels obtenus par l'analyse psychrométrique sont légèrement plus élevés que ceux obtenus par la simulation numérique sauf pour Alger. La simulation numérique prend en considération tous les détails de la construction, ce qui n'est pas le cas de l'analyse psychrométrique.

## IV.10 Conclusion

L'analyse bioclimatique est généralement plus simple et conceptuelle, tandis que la simulation dynamique est complexe et détaillée.

Les résultats de l'analyse bioclimatique sont plus généraux et basés sur des moyennes, tandis que ceux de la simulation dynamique sont précis et basés sur des données temporelles détaillées.

En résumé, l'analyse bioclimatique fournit des directives de conception passives basées sur le climat local, tandis que la simulation dynamique offre une modélisation détaillée et précise des performances thermiques et énergétiques d'un bâtiment en fonctionnement. Les deux méthodes sont complémentaires et peuvent être utilisées ensemble pour concevoir des bâtiments éco énergétiques et confortables.

## Références bibliographiques

- [1] Sarri, A., Bechki, D., Bouguettaia, H., Al-Saadi, S. N., Boughali, S., & Farid, M. M. (2021). Effect of using PCMs and shading devices on the thermal performance of buildings in different Algerian climates. A simulation-based optimization. *Solar Energy*, 217, 375-389.
- [2] Klein, S. A. (1988). TRNSYS-A transient system simulation program. *University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report*, 38-12.
- [3] [programme-formation-trnsys.pdf \(amoes.com\)](#)
- [4] BOUQUIAUX Adrien. La simulation thermique dynamique appliquée à la rénovation d'un bâtiment selon le standard passif. Mémoire de Master. Belgique : Université catholique de Louvain, 2017, 65
- [5] Energy Saver Guide - Energy.gov
- [6] Ecohome - Interior Shading
- [7] Ebert, R. (1993). Développement d'un environnement de simulation de systèmes complexes. Application aux bâtiments (Thèse de doctorat).
- [8] Belkhouane, H. (2017). Etude de l'impact des modèles de confort sur la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's type bureaux (Cooling dominated)
- [9] Bendjaouane, S., Lemherzi, N., & OUDRANE, A. (2020). *Evaluation du confort thermique dans les anciennes bâtisses de la région d'Adrar* (Thèse de doctorat).
- [10] Hoyet, V., Pannier, M. L., Robillart, M., & Rousseau, D. (2022, May). Vers le développement de modèles prédictifs individualisés du confort thermique pour les logements connectés. In *Conférence IBPSA France 2022*.
- [11] Schreck, C., Fouquier, A., Rouchier, S., & Wurtz, E. (2022, May). Analyse statistique du confort thermique estival dans un bureau naturellement ventilé. In *IBPSA France 2022* (pp. 1-8).

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

En Algérie, comme dans le reste du monde, plusieurs secteurs tels que le transport, la fabrication et la construction reposent sur l'utilisation de l'énergie. Parmi ces secteurs, ce sont les bâtiments qui consomment le plus d'énergie. Cette situation pose un défi économique, environnemental et climatique majeur.

La maîtrise du confort thermique et de la consommation énergétique dans les bâtiments est un enjeu de plus en plus important. Les systèmes de climatisation passifs offrent une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles de climatisation. Toutefois, leur efficacité dépend fortement du climat local et de la conception des bâtiments. Une analyse approfondie des conditions climatiques locales permet de découvrir de nombreuses possibilités pour élaborer des stratégies simples et efficaces, garantissant un confort thermique adéquat.

Pour répondre aux défis posés par ce contexte énergétique, nous avons conduit dans ce mémoire une étude comparative entre deux outils d'analyse thermique. L'intérêt est de fournir une approche systématique et méthodologique pour évaluer le potentiel de conception bioclimatique dans les zones climatiques algériennes sur la base d'ensembles de données météorologiques actualisées. Des recommandations validées de conception bioclimatique pour le confort et le chauffage et le refroidissement passifs en Algérie sont obtenues en utilisant la simulation de la performance des bâtiments à travers un cas d'étude.

Nous avons évalué le potentiel des différents concepts de chauffage et de rafraîchissement passif adaptés à chaque zone climatique après avoir caractérisé les divers climats en Algérie. Pour ce faire, nous avons appliqué la méthode bioclimatique de Givoni, permettant ainsi d'identifier les stratégies les plus appropriées et efficaces pour chaque zone climatique. Cette étude a été menée sur six villes représentatives des six zones climatiques d'Algérie, afin de couvrir une gamme complète des conditions climatiques variées présentes à travers le pays. Les villes étudiées comprennent Alger, Constantine, Sétif, Relizane, Béchar et Tamanrasset, chacune incarnant les caractéristiques climatiques distinctes de sa région respective.

Les résultats de notre étude montrent :

- En absence de stratégies passives, les pourcentages de temps de confort obtenus par l'analyse psychrométrique sont légèrement plus élevés, surtout en hiver, avec des écarts plus marqués dans les climats **chauds** comme Tamanrasset et Béchar.
- Pour la ventilation naturelle, les résultats indiquent que les villes d'Alger, Constantine et Sétif présentent des pourcentages de confort thermique relativement similaires entre les deux approches, avec des valeurs légèrement plus élevées obtenues par la simulation numérique. En revanche, pour les villes de Relizane, Béchar, et Tamanrasset, l'analyse bioclimatique fournit des pourcentages de confort plus élevés.
- La simulation numérique révèle une efficacité notable de la protection solaire à Sétif. Toutefois, l'analyse bioclimatique suggère que cette stratégie améliore davantage le confort thermique dans les autres villes étudiées.
- Le potentiel de l'inertie thermique obtenu par la simulation dynamique est plus faible, probablement due à l'utilisation d'un mur unique pour toutes les villes, tandis que l'analyse bioclimatique considère l'inertie thermique optimale pour chaque climat spécifique.

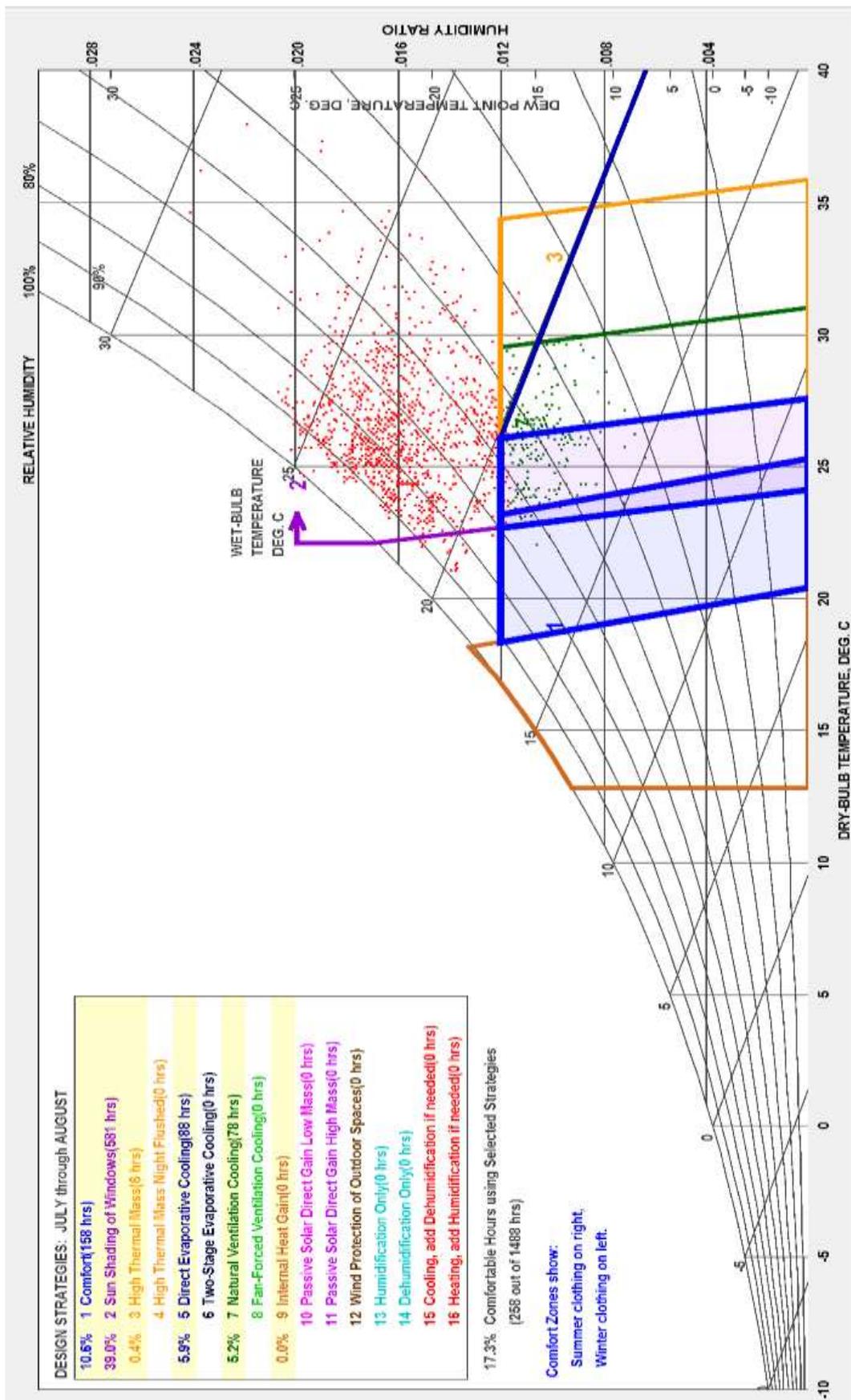
- Pour le chauffage solaire passif, les résultats de l'analyse psychrométrique sont supérieurs à ceux obtenus par la simulation dynamique. Cet écart est probablement dû aux gains de chaleur que l'analyse psychrométrique considère en totalité (sans pertes), alors que la simulation dynamique dépend de la structure choisie du bâtiment pour estimer les pertes de chaleur.

En conclusion, malgré la forte corrélation entre les deux approches d'analyse du potentiel bioclimatique (basées sur les cartes psychrométriques et simulation), les résultats indiquent des différences dans les estimations du potentiel bioclimatique dans plusieurs villes à dominance de chauffage comme Sétif, Constantine et des villes à dominance de refroidissement comme Tamanrasset et Bechar.

L'étude doit être étendue à d'autres stratégies passives (évaporatif, l'orientation, mur trombe...) et à d'autres villes (chaque zone doit être représentée par au moins trois villes) afin d'identifier la stratégie de conception bioclimatique la plus efficace dans chaque zone climatique. Nous pensons que les architectes et les ingénieurs du bâtiment peuvent appliquer nos résultats à leurs concepts dès les premières étapes de la conception afin d'améliorer le confort thermique intérieur en utilisant des solutions de conception passive. Les tableaux et figures présentés dans cette étude permettent aux concepteurs d'appliquer des stratégies de conception bioclimatique adéquates et d'évaluer le besoin de systèmes actifs dans chaque zone climatique.

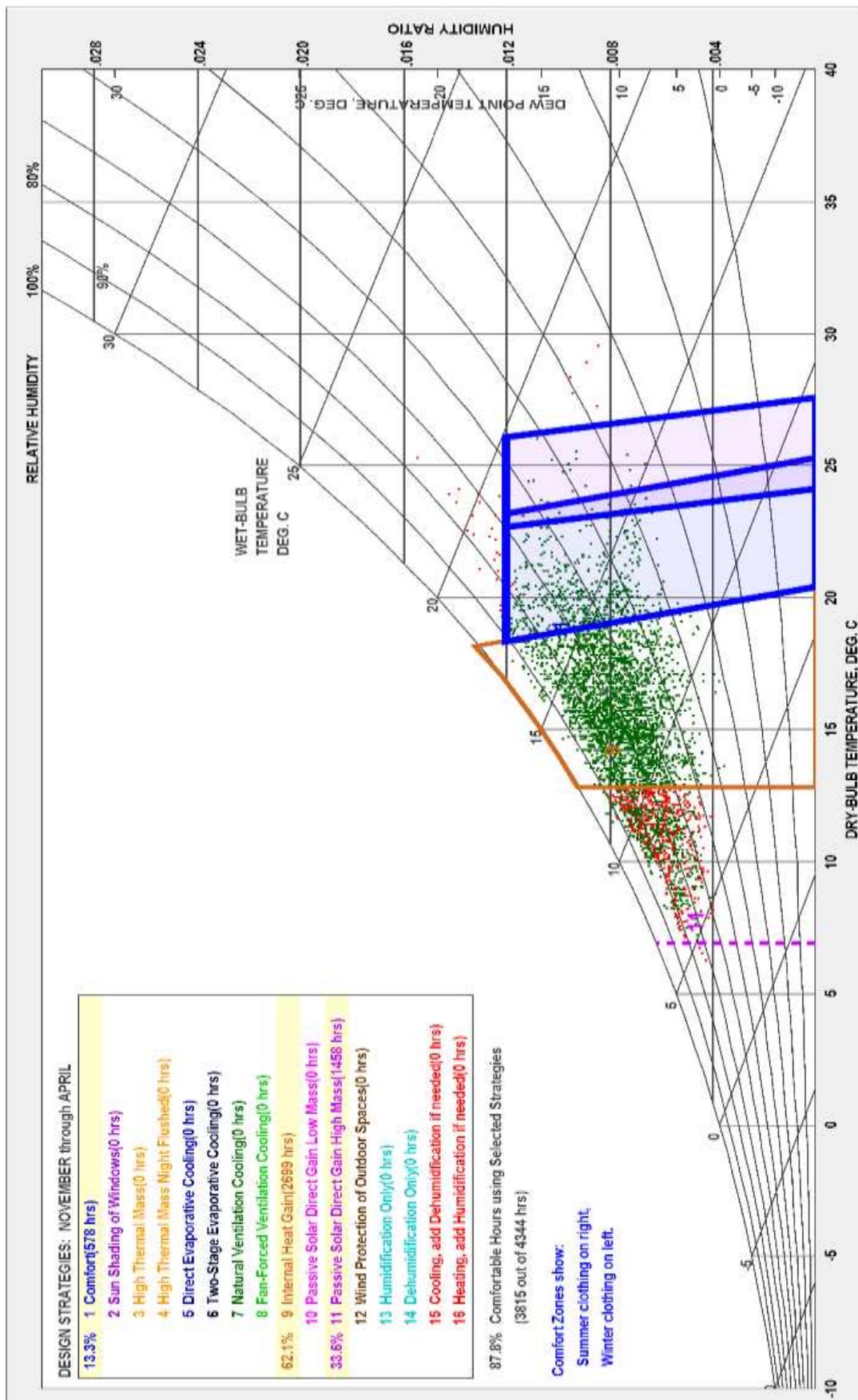
# ANNEXES

## Annexe 1 Carte psychrométrique de la ville d'Alger



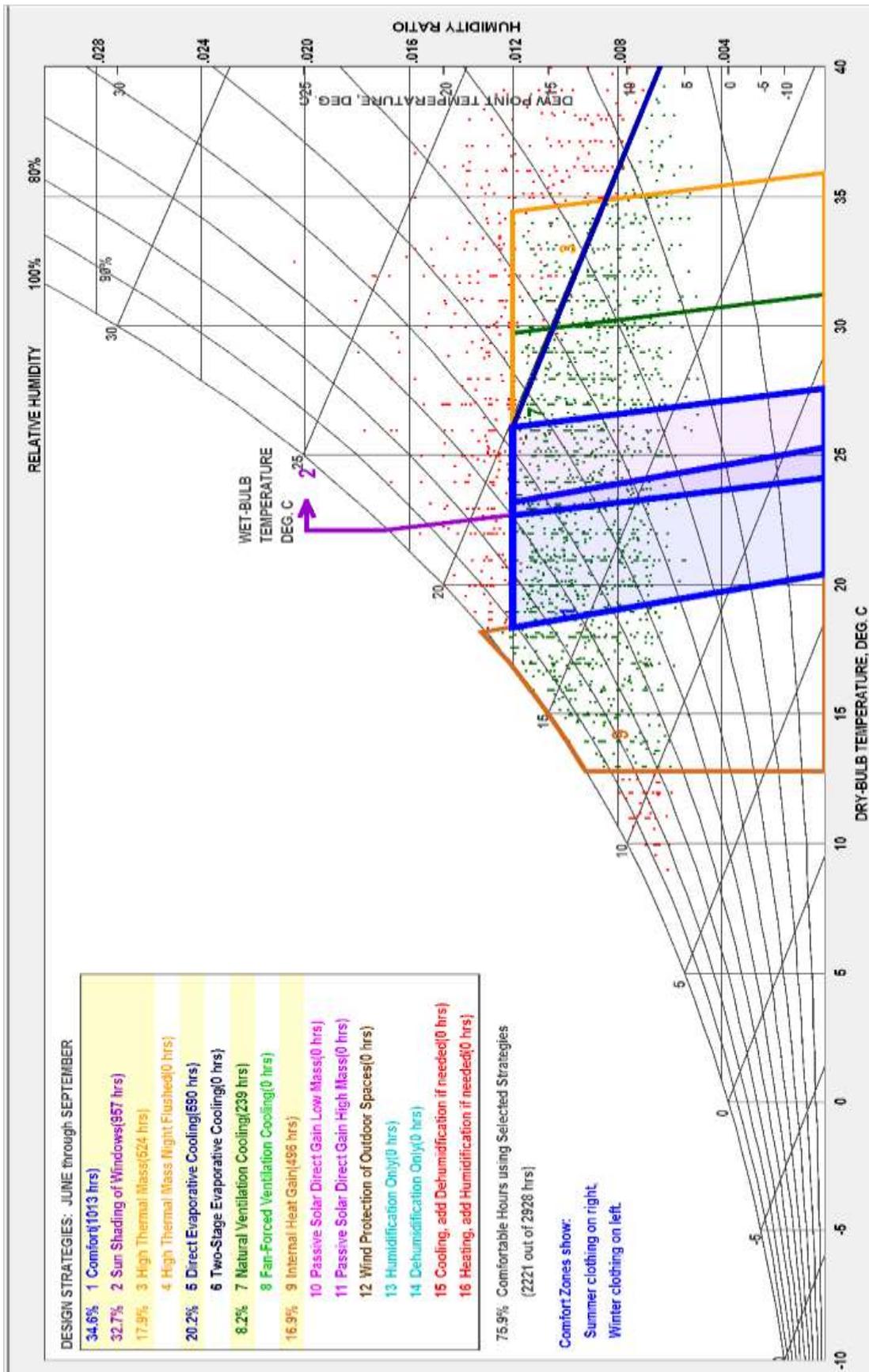
## A. Période d'été

## Annexe 1 Carte psychrométrique de la ville d'Alger



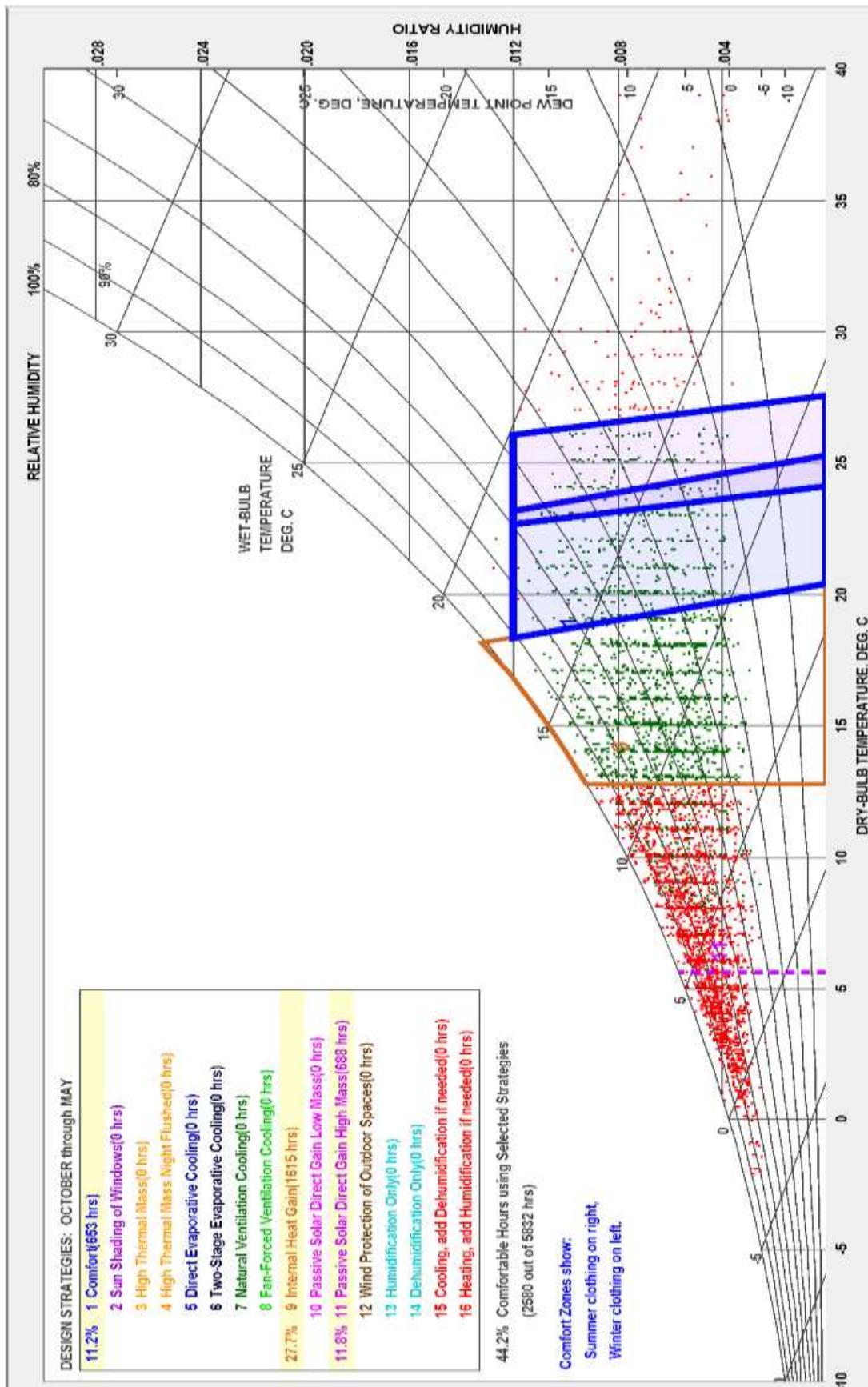
## B. Période d'hiver

Annexe 2 Carte psychrométrique de la ville de Constantine



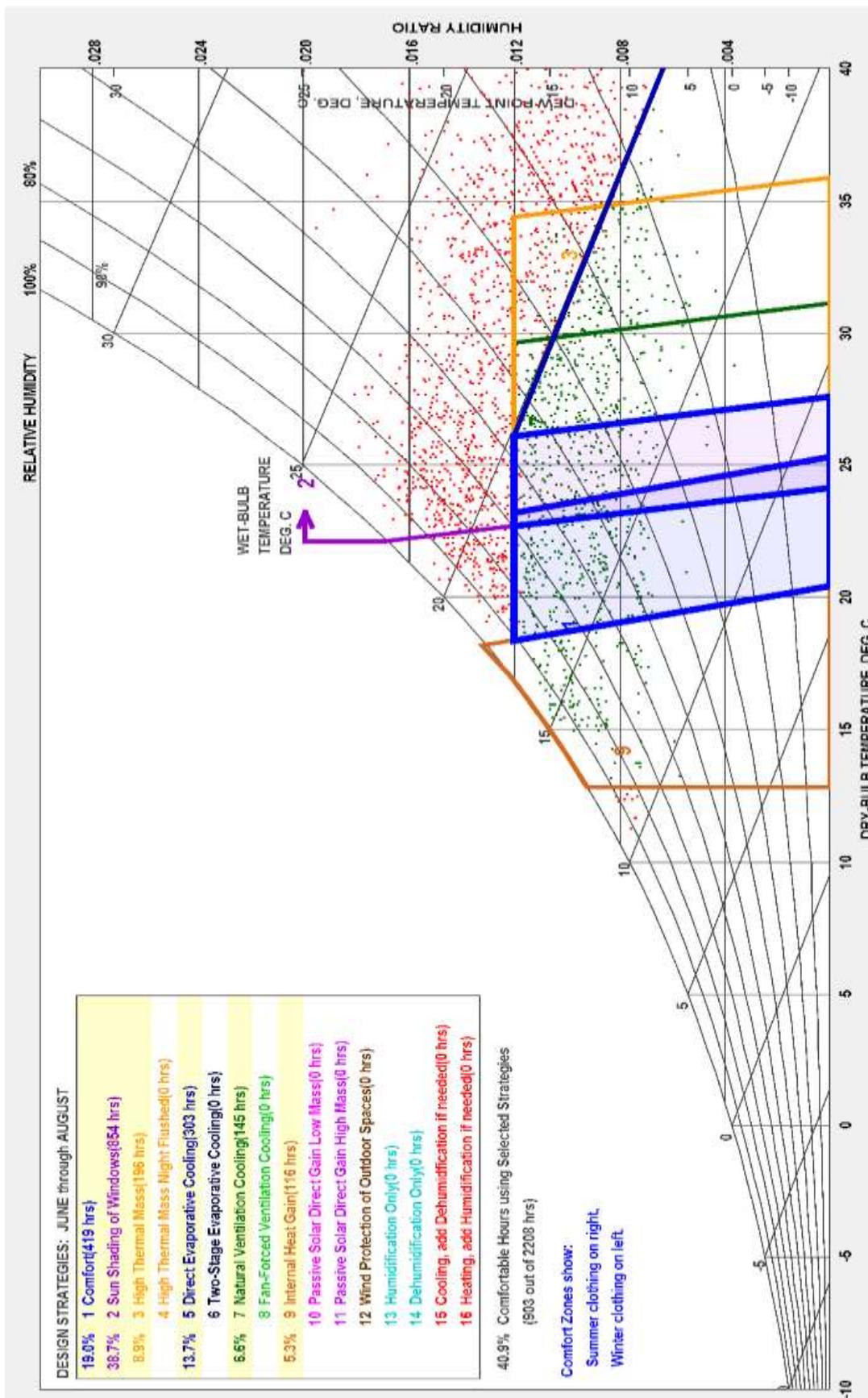
A. Période d'été

B. Annexe 2 Carte psychrométrique de la ville de Constantine



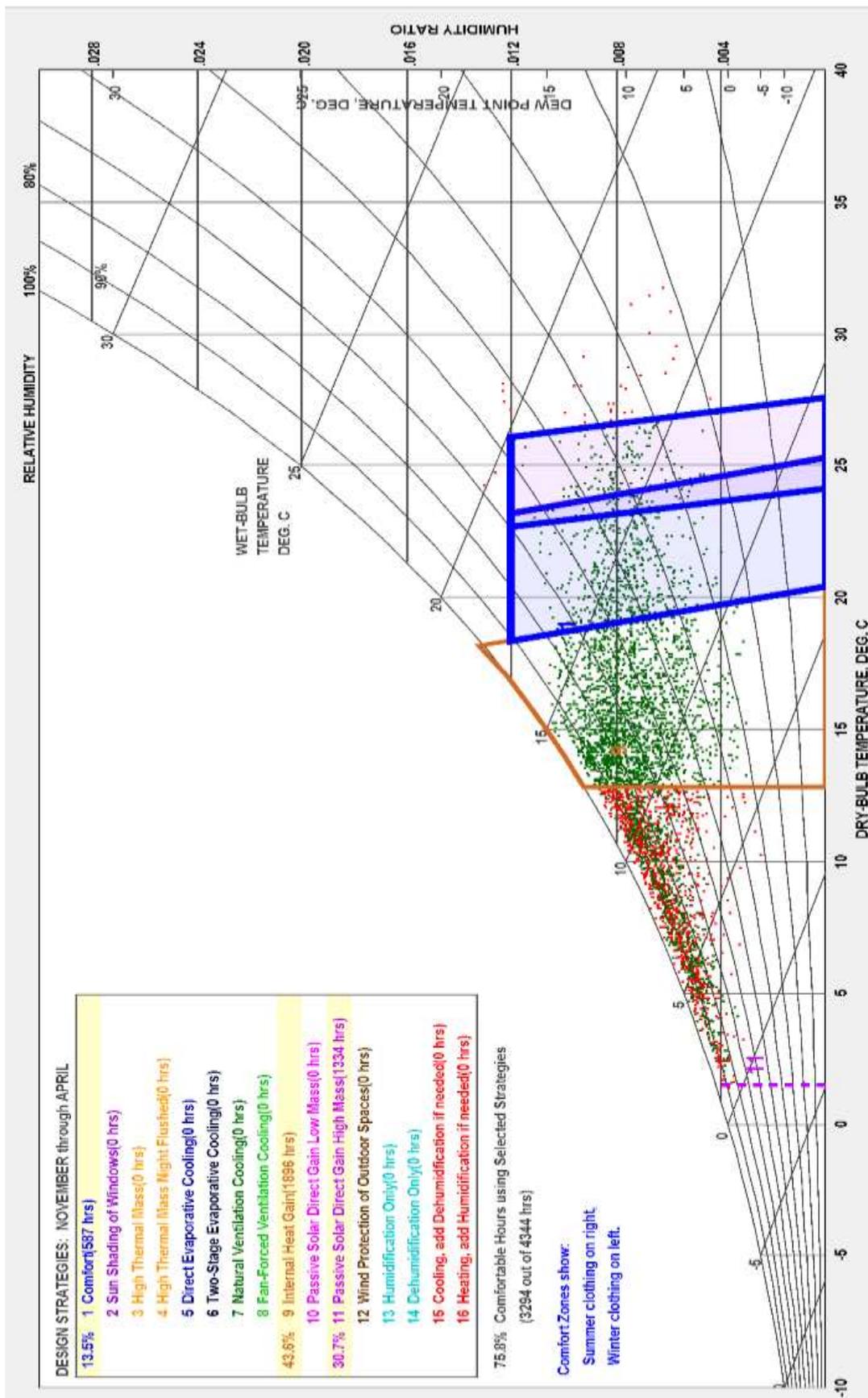
C. Période d'hiver

## Annexe 3 Carte psychrométrique de la ville de Relizane



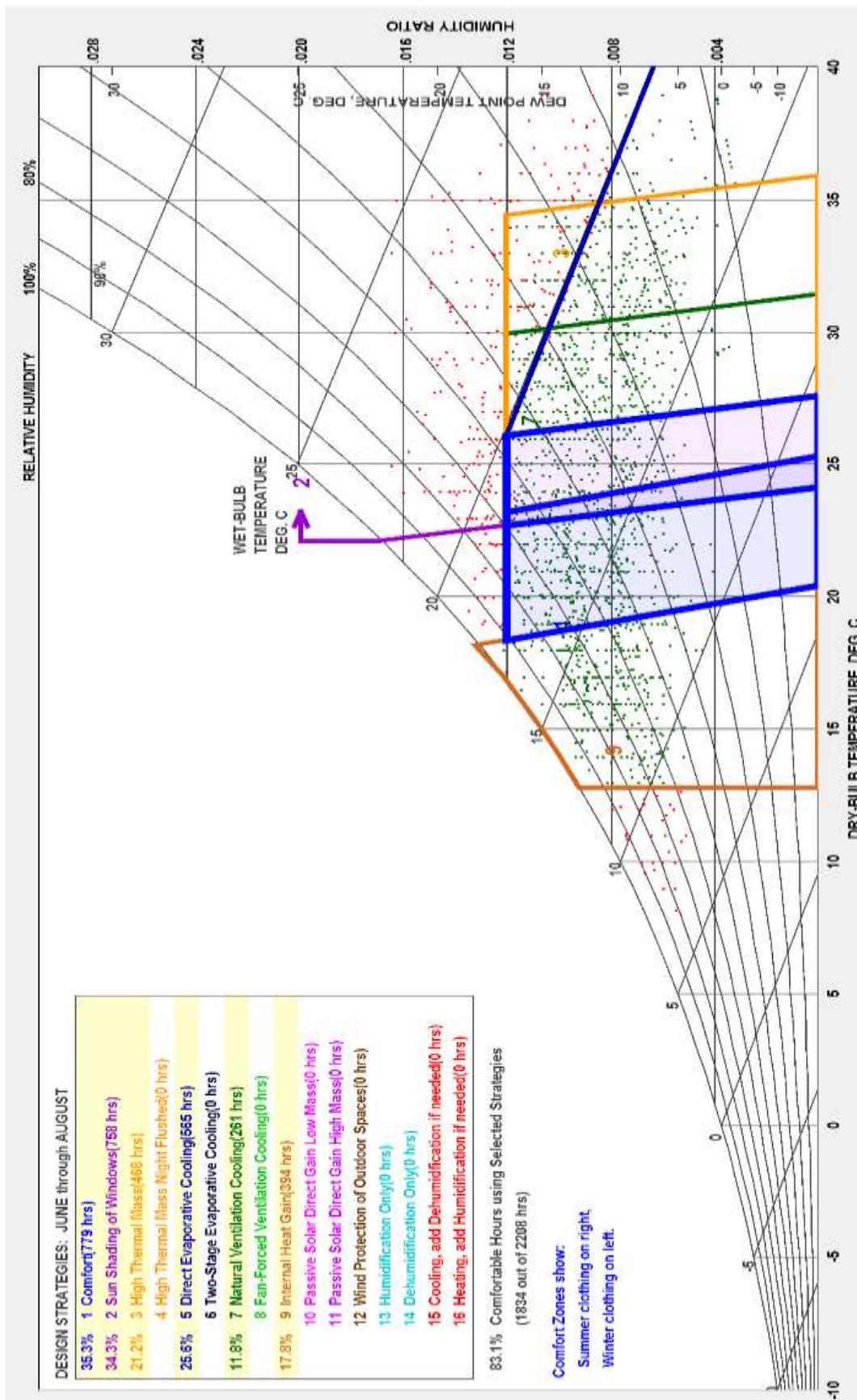
## A. Période d'été

## Annexe 3 Carte psychrométrique de la ville de Relizane



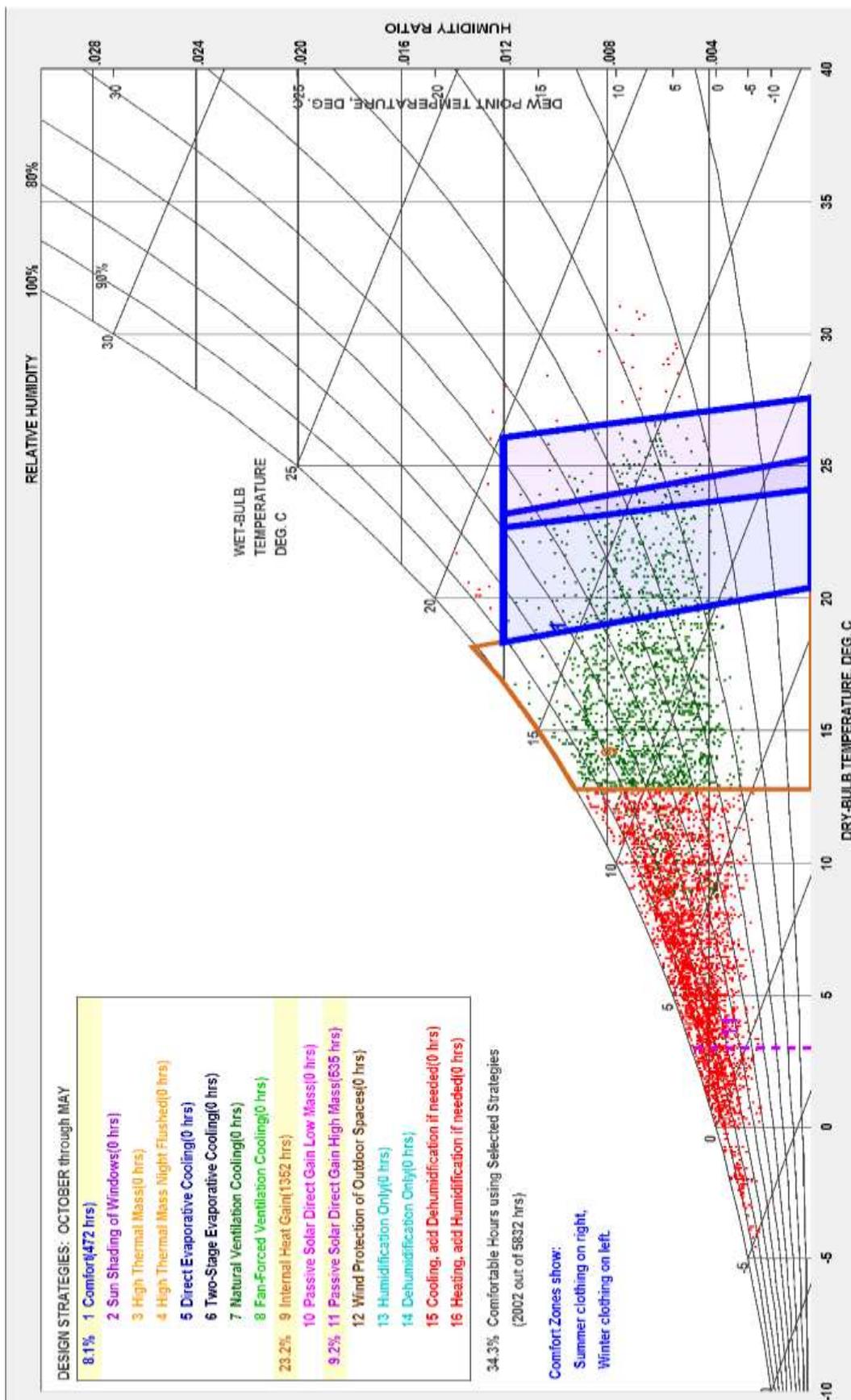
B. Période d'hiver

## Annexe 4 Carte psychrométrique de la ville de Sétif



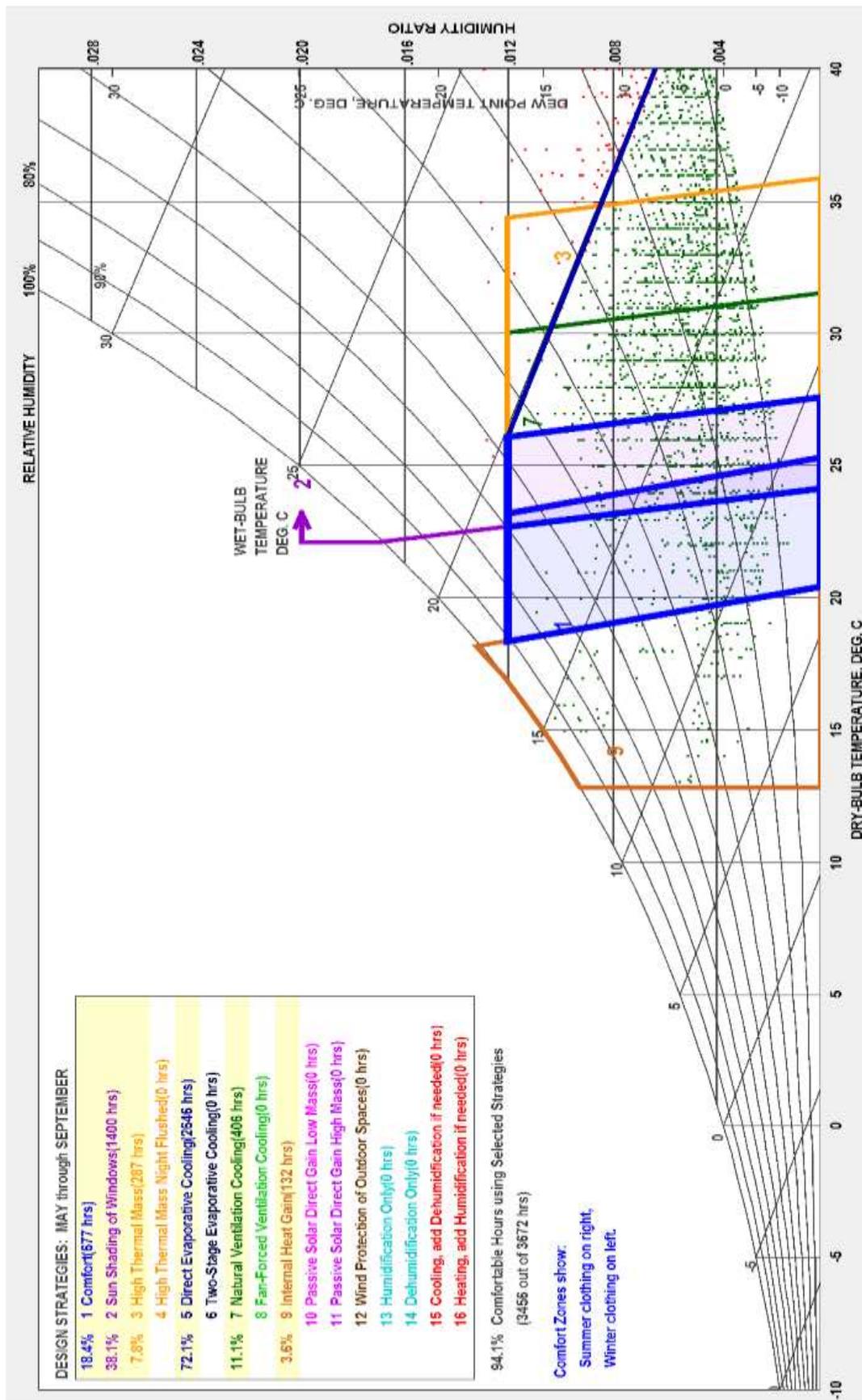
## A. Période d'été

## Annexe 4 Carte psychrométrique de la ville de Sétif



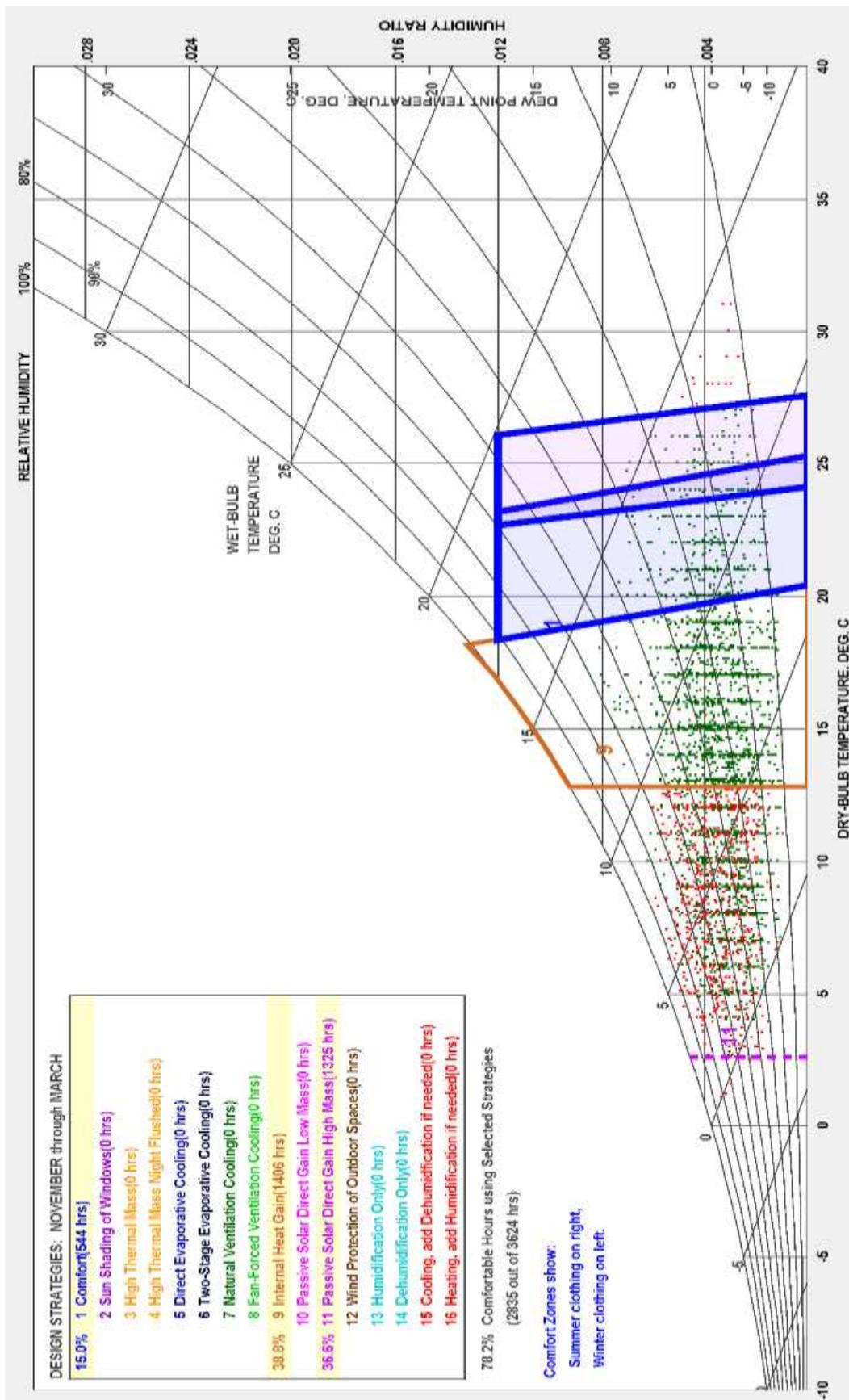
## B. Période d'hiver

## Annexe 5 Carte psychrométrique de la ville de Bechar



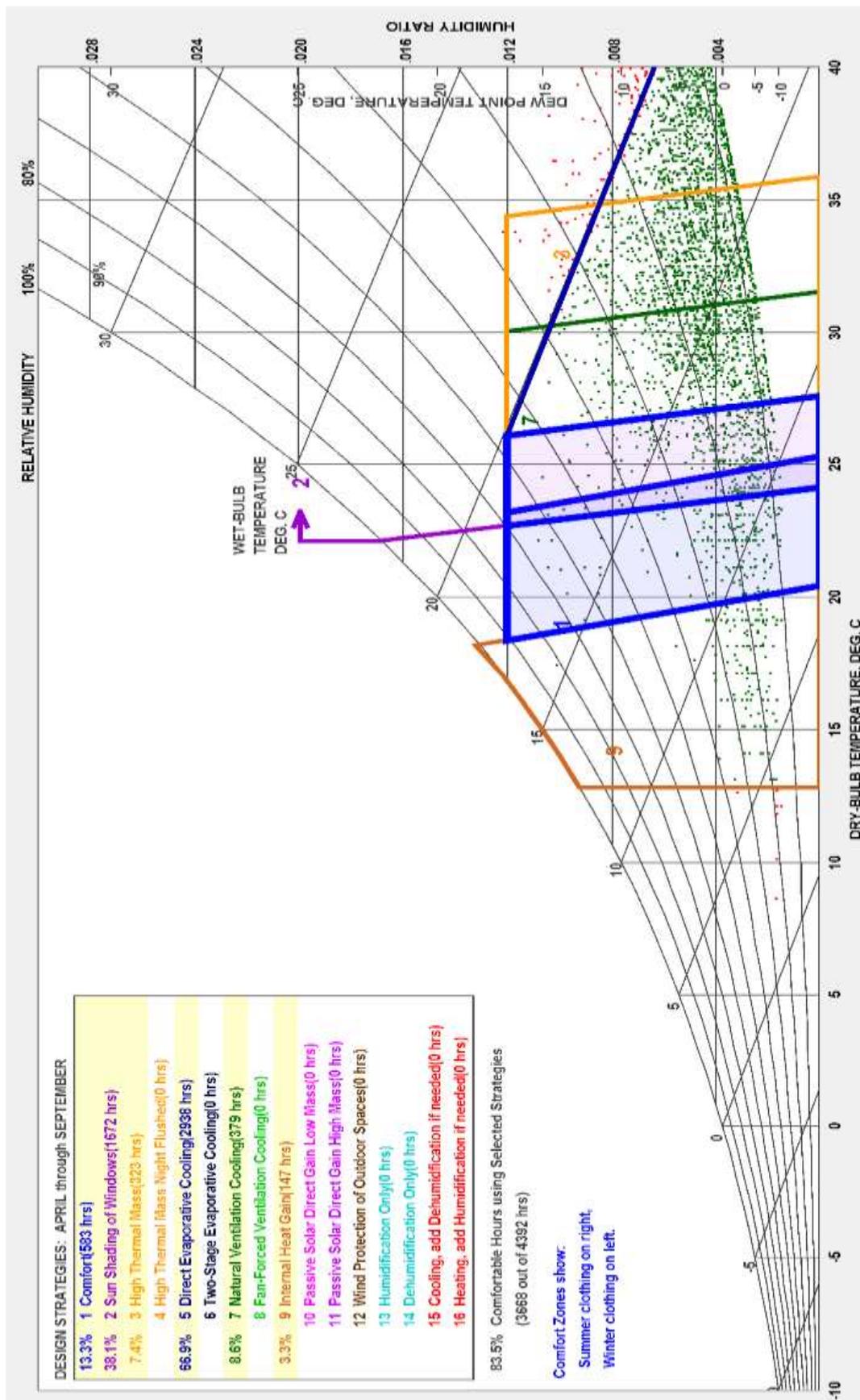
## A. Période d'été

Annexe 5 Carte psychrométrique de la ville de Bechar



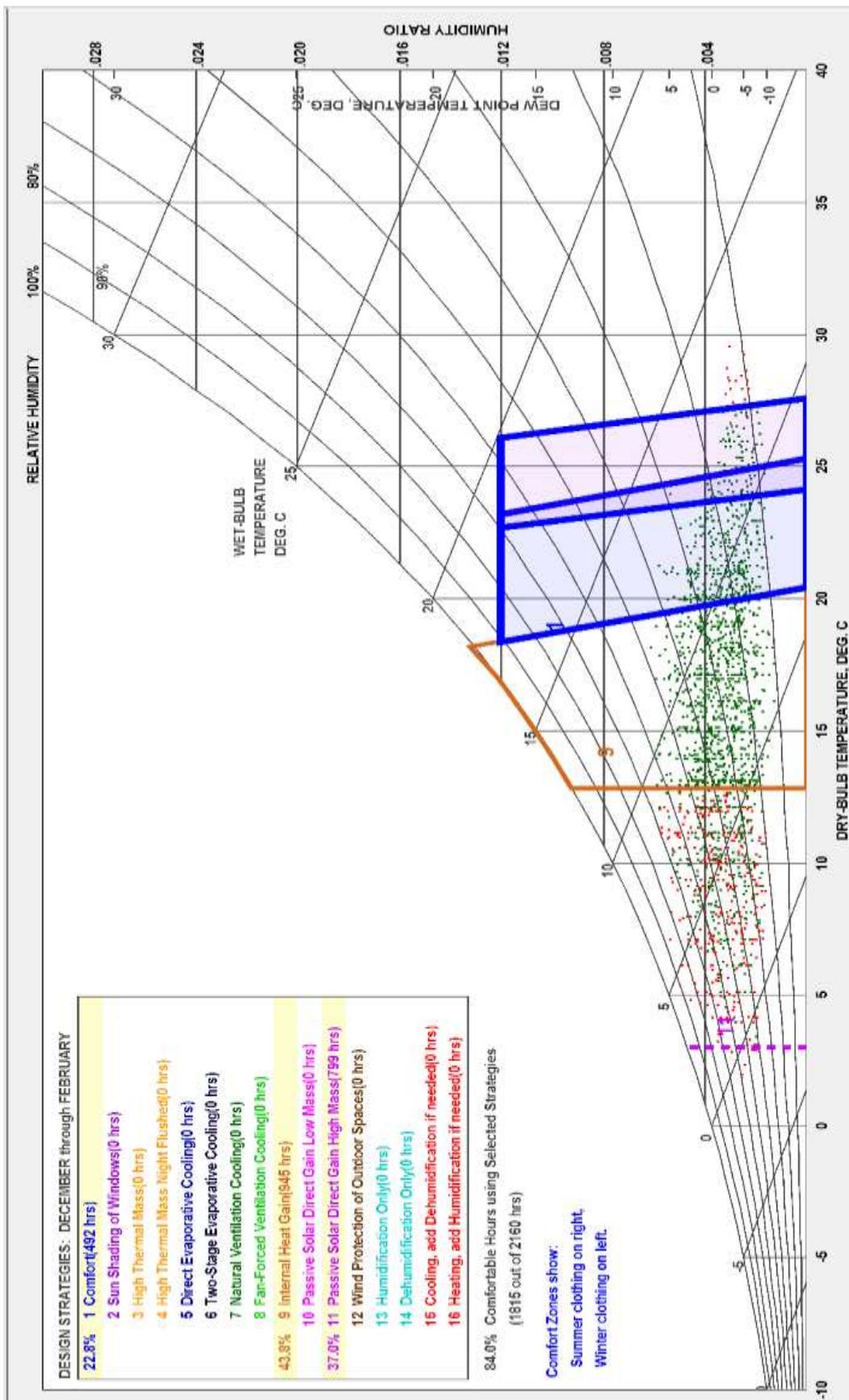
B. Période d'hiver

## Annexe 6 Carte psychrométrique de la ville de Tamenrasset



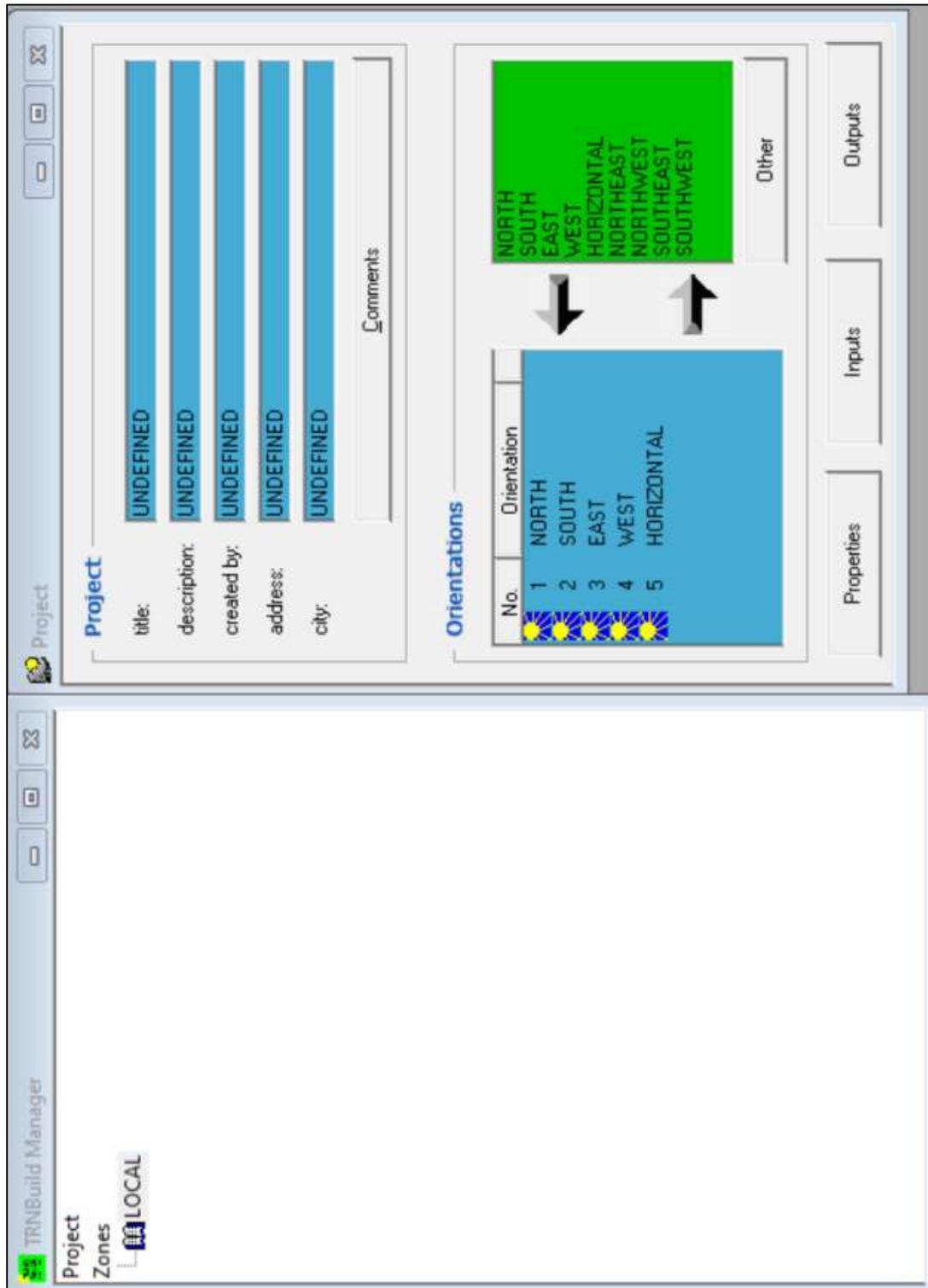
A. Période d'été

Annexe 6 Carte psychrométrique de la ville de Tamenrasset



B. Période d'hiver

Annexe 7 Définitions des orientations et des zones.



## Annexe 8 Définition des paramètres thermo physique des couches.

Layer Type Manager

 layer type: **BETON**

Massive Layer    Massless Layer    Active Layer    Chilled Ceiling

**Massive Layer**

conductivity: **6.12** kJ / h m K

capacity: **0.84** kJ / kg K

density: **2500** kg / m<sup>3</sup>

## Annexe 9 Définition du mur.

Wall Type Manager

wall type: **MURNORD**

**front / inside**

No.	Layer	Thickness	Type
1	PLATRE	0.015	massive
2	BRIQUE	0.100	massive
3	AIR	0.050	massive
4	BRIQUE	0.100	massive
5	CIMENT	0.025	massive

**back**

total thickness:  m

u - value:   $W/m^2 K$  (incl.  $\alpha_{i,s}=7.7 W/m^2 K$  and  $\alpha_{o,s}=25 W/m^2 K$ )

**Solar Absorptance of Wall**

front:  -

back:  -

**Convective Heat Transfer Coefficient of Wall**

Front

userdefined  internal calculation   $kJ/h m^2 K$

Back

userdefined  internal calculation   $kJ/h m^2 K$

Layer

<< new ...

<< Library ...

PLATRE

BRIQUE

CIMENT

PLATRE2

BETON2

POLYSTER

CIMENT2

CARLAGE

MORTIERSABLE

BETON

EPS

BETONN

AIR

OK Cancel Save to user library

R D C N

## Annexe 10 Définition des fenêtres.

Window Type Manager

window type: **FENETRE**

 **WinID** Pool Lib

**Glazing**

ID number:  u-value:  W/m<sup>2</sup>K values acc. to glazing library (for reference only)

slope of window:  degree g-value:  %/100

For 1 glazing module width:  m height:  m ID spacer:  Data from wd4-lib.dat

**Frame**

area frame/window:  %/100 u-value (1/R):  kJ/h m<sup>2</sup>K (without conv. + rad. heat transfer coefficients!)

solar absorptance:

**Optional Properties of Shading Devices**

**Additional Thermal Resistance**

internal device:  h m<sup>2</sup>K/kJ

external device:  h m<sup>2</sup>K/kJ

**Reflection Coefficient of Internal Device**

towards window:  %/100

towards zone:  %/100

**Fraction of abs. Solar Radiation to Zone Air Node (CCISHADE)**

%/100

**Convective Heat Transfer Coefficient of Window (glazing + frame)**

**Front (inside)**

userdefined  internal calculation  kJ/h m<sup>2</sup>K

**Back (outside)**

userdefined  internal calculation  kJ/h m<sup>2</sup>K

OK Cancel Save to user library **RDCN**

## Annexe 11 Définition des parois constituant une zone.

**LOCAL**

**Regime Data**

zone volume: 144 m<sup>3</sup>    Initial Values

capacitance: 172.8 kJ/K

Infiltration    Heating    Gains    Humidity

Ventilation    Cooling    Comfort

---

**Walls**

Type	Area	Category	u-Value	g-Value
Additional Windows				
MURSUD	24.00	EXTERNAL	SOUTH	
MURNORD	24.00	EXTERNAL	NORTH	
MUREST	18.00	EXTERNAL	EAST	
MURQUEST	18.00	EXTERNAL	WEST	
PLAFOND	48.00	EXTERNAL	HORIZON	

Add    Delete

wall type: MURSUD    <-- new ...

area: 24 m<sup>2</sup>    incl. windows

category: EXTERNAL

geosurf: 0    1    kJ/h

wall gain: 0

orientation: SOUTH    NORTH

view fac. to sky: 0.5

---

**Windows**

Type	Area	Category	u-Value	g-Value
FENETRE	1.50	EXTERNAL	5.74	0.87
FENETRE	1.50	EXTERNAL	5.74	0.87
FENETRE	1.50	EXTERNAL	5.74	0.87
FENETRE	1.50	EXTERNAL	5.74	0.87

Add    Delete

window type: FENETRE    <-- new ...

area: 1.5 m<sup>2</sup>

category: EXTERNAL

geosurf: 0    7    kJ/h

gain: 0

orientation: SOUTH    NORTH

view fac. to sky: 0.5

internal shad. factor: 0

external shad. factor: 0

Annexe 12 Définitions des outputs pour le calcul des besoins énergétiques.

Output Data

userdefined  
 default

**Thermal Zones**

thermal zones

No	Thermal Zone
1	LOCAL

Possible Thermal Zones

zone outputs    group of zone outputs    surface outputs    balances

**NTypes**

No	NType	Key	Additional Data
1	62	predicted	not available
2	63	predicted	not available
3	1	air	not available
4	30	sensible	not available
5	31	sensible	not available
6	25	operative	not available

Possible Outputs (NTypes)

NType	Key	Description
1	TAIR	air temperature of zone
2	QSENS	sensible energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
3	QCSURF	total convection to air from all surfaces within zone (incl. inte
4	QINF	sensible infiltration energy gain of zone
5	QVENT	sensible ventilation energy gain of zone
6	QCOUP	sensible coupling energy gain of zone
7	QGCONV	internal convective gains of zone
8	DQAIR	change in internal sensible energy of zone air since beginnir
9	RELHUM	relativ humidity of zone air
10	QLATD	latent energy demand of zone, humidification(-), dehumidifica
11	QLATG	latent energy gains including ventilation, infiltration, coupling
12	QSOLTR	total shortwave solar radiation transmitted through external v

OK   Cancel

# Évaluation du potentiel des stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie : comparaison entre les méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique.

## Résumé

La consommation d'énergie et le confort thermique dans les bâtiments sont fortement influencés par les conditions climatiques. Dans ce travail, on évalue le potentiel de quelques stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie, en comparant deux outils d'analyse : la méthode psychrométrique et la modélisation dynamique.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le logiciel Climate Consultant pour réaliser une analyse bioclimatique des différentes zones climatiques en Algérie. Cette analyse a permis d'identifier les stratégies passives les plus efficaces pour chaque zone, en fonction des données climatiques locales. Le potentiel de ces stratégies pour améliorer le confort thermique des occupants tout en réduisant la consommation énergétique a été évalué.

Dans un second temps, nous avons modélisé et simulé le comportement thermique d'un local en utilisant le logiciel TRNSYS. Ces simulations ont permis de comparer les résultats de l'analyse psychrométrique avec ceux obtenus par la modélisation numérique. L'objectif de cette comparaison est d'évaluer la pertinence des outils graphiques dans les différents climats. Les résultats permettent aux architectes et aux urbanistes de mieux comprendre le climat et de fournir des conseils pratiques en matière de conception.

La combinaison des analyses bioclimatiques et des simulations dynamiques constitue une approche stratégique pour relever les défis climatiques et énergétiques actuels en Algérie. Cette approche contribue de manière significative à la transition vers des bâtiments plus durables et à faible empreinte carbone.

**Mots clés** : TRNsys, Climate Consultant, confort thermique, stratégies passives.

## Abstract

The energy consumption and thermal comfort in buildings are heavily affected by weather conditions.

In this work, we evaluate the potential of some passive heating and cooling strategies in Algeria, by comparing two analysis tools: the psychrometric method and dynamic modelling.

Firstly, we used Climate Consultant software to carry out a bioclimatic analysis of the different climatic zones in Algeria. This analysis enabled us to identify the most effective passive strategies for each zone, based on local climate data. The potential of these strategies to improve thermal comfort for occupants while reducing energy consumption was assessed.

Secondly, we modelled and simulated the thermal behaviour of a single room using TRNSYS software. These simulations were used to compare the results of the psychrometric chart-based analysis with those obtained from the numerical modelling. The aim of this comparison is to assess the relevance of the graphical tools in different climates. The results provide architects and builders with a better understanding of the climate and practical design advice.

The combination of bioclimatic analyses and dynamic simulations is a strategic approach to meeting Algeria's current climate and energy challenges. This approach makes a significant contribution to the transition towards more sustainable, low-carbon buildings.

**Keywords** : TRNsys, Climate Consultant, thermal comfort, passive strategies