



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



Université Larbi Tébessi - Tébessa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Architecture

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du  
diplôme de master Académique

***Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la ville***

***Filière : Architecture***

**Option : Architecture et environnement**

Thème :

**L'effet de l'ombrage sur le confort thermique d'été  
dans les espaces extérieurs**

**Cas d'étude : La Place Thagaste a Souk Ahras.**

Elaboré par :  
Fakir Mounir

Encadré par :  
Lacheheb Sara

**Soutenu devant le jury composé de :**

- 01- Mr. Fezzai Soufiane
- 02- Meme. Lacheheb Sara
- 03- Mr. Ahriz Atef

Président  
Rapporteur  
Examineur

Année universitaire : 2018/2019

## **Dédicace :**

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents ;

Ma femme ;

Mes enfants.

## Remerciements :

*Nous tenons à remercier sincèrement et profondément en Premier lieu notre Dieu « Allah » qui nous guidé sur le droit chemin tout au long du travail et nous avons inspiré les bons pas et les justes réflexes.*

*Nous adressons nos vifs remerciements au Madame SARA LACHEHEB, qui a bien accepté de nous encadrer et aussi pour ses précieux conseils, ses orientations et sa patience.*

*Je remercie aussi mes enseignants de l'institut d'architecture de Tébessa.*

*A tous mes amis particulièrement ; HASNI Mehdi, KHADRAOUI Mohamed Laid, HASNI Sid Ali, HAMBLI Azzedine, ZERNIKH Larbi.*

*Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques. En signe d'un profond respect.*

**Résumé :**

Dans les villes actuelles, il existe de nombreuses formes d'espace extérieur pour les résidents à utiliser, comme les places, les rues piétonnes et des terrains de sport. L'efficacité du service de l'espace extérieur est fortement affectée par le confort thermique. Lorsque le sentiment de la population pour l'environnement thermique est dans la gamme acceptable de confort ; les gens ont tendance à rester plus à l'extérieur, alors qu'ils vont rester plus court quand ils se sentent mal à l'aise. Ainsi, que le niveau de confort thermique est d'une importance vitale pour l'espace extérieur.

La présente étude examine l'impact de l'ombrage sur le confort thermique extérieur d'été de la place Thagaste a souk ahras, caractérisé par un climat semi humide avec des températures très élevées, atteindre 39.7 C°. Nous avons créé deux scénarios différents pour évaluer le rôle de l'ombrage. L'évaluation a été réalisée dans la journée la plus chaude en été. L'évaluation du confort thermique extérieur est basée sur une utilisation de deux indices de confort thermique, le PMV (vote moyen prévisible) et l'UTCI (indice thermique universel du climat) et sera faite par le biais de la simulation numérique (logiciel ENVI-met). Les résultats montrent que la température peut être diminuée d'environ 1.80 C° et PMV à 2.01. L'étude montre comment l'ombre affect sur le confort thermique extérieur.

**Mots clés:**

Effet d'ombrage -Confort thermique - espace extérieur –Simulation ENVI-met.

**Abstract:**

In today's cities, there are many forms of outdoor space for residents to use, such as squares, pedestrian streets and sports fields. The efficiency of outdoor space service is strongly affected by thermal comfort. When the feeling of the population for the thermal environment is within the acceptable range of comfort; people tend to stay out, so they will stay shorter when they feel uncomfortable. Thus, the level of thermal comfort is of vital importance for the outdoor area.

The present study examines the impact of shading on summer outdoor thermal comfort from Thagaste Square in souk ahras, characterized by a semi-humid climate with very high temperatures, reaching 39.7 C °. We have created two different scenarios to evaluate the role of shading. The evaluation was carried out in the hottest day in the summer. The assessment of the external thermal comfort is based on the use of two indices of thermal comfort, the PMV (average predictable vote) and the UTCI (universal thermal index of the climate) and will be made by means of numerical simulation (ENVI software -met).

The results show that the temperature can be decreased from about 1.80 ° C and PMV to 2.01. The study shows how the shadow affects on outdoor thermal comfort.

**Keywords:**

Shading effect -thermal comfort - outdoor area -Simulation ENVI-met.

## Table des matières :

Résumé :

Table des matières :

Liste des figures :

Liste des tableaux :

Liste des graphes :

### INTRODUCTION GENERALE :

Introduction :.....	I
1- Problématique : .....	II
2- Hypothèses : .....	II
3- Objectif de la recherche :.....	II
4- Méthodologie :.....	III
5- Structure du mémoire :.....	III

### CHAPITRE I : Le confort thermique dans les espaces publics extérieurs

I- Introduction : .....	1
I-1-Confort thermique : .....	2
I-2-Les paramètres du confort thermique :.....	2
I-2-1-Paramètres relatifs à l'environnement :.....	3
I-2-1-1- La Température moyenne radiante (TMR) :.....	3
I-2-1-2-Température de l'air :.....	4
I-2-1-3-Humidité relative :.....	4
I-2-1-4-La vitesse de l'air :.....	4
I-2-1-5-Rayonnement solaire :.....	4
I-1-2-Paramètres relatifs à l'individu :.....	5
I-1-2-1- Mécanismes de thermorégulation :.....	5
I-1-2-2- Le métabolisme et les échanges thermiques :.....	5
I-1-2-3-les vêtements :.....	7
I-3- Les phénomènes d'échange de chaleur :.....	7
I-3-1-La conduction :.....	8
I-3-2-La convection :.....	8
I-3-3-Rayonnement :.....	9
I-3-4-Les échanges de chaleur latente :l'évaporation :.....	9
I-3-5- Les échanges de chaleur par respiration :.....	9

I-3-6- Equation du bilan thermique :.....	9
I-4- Méthodes expérimentales d'évaluation du confort thermique :.....	10
I-4-1-Approche physique : .....	10
I-4-2-Approche physiologique :.....	10
I-4-3- Approche psychologique ou subjective :.....	11
I-5- L'évaluation du confort thermique :.....	11
I-5-1- Indices de l'équation du bilan thermique :.....	11
I-5-2- Indices de l'équation du bilan d'énergie :.....	11
I-5-3- des modèles graphiques :.....	12
I-5-4- les indices climatiques empiriques :.....	12
I-5-5- les indices psycho-socio climatiques :.....	12
I-6- Les indices d'évaluation du confort thermique :.....	12
I-6-1- PMV (Vote Moyen Prévisible– Predicted Mean Vote):.....	12
I-6-2- La température physiologique équivalente(PET) :.....	15
I-6-3- L'indice de température standard effective en espaces extérieurs(OUT_SET*) :..	16
I-6-4- Le vote de sensation effective (Actual Sensation Vote)-ASV- :.....	17
I-6- 5- La température perçue :.....	18
I-6-6- L'indice de sensation thermique (TSI) :.....	19
I-6-7- L'indice thermique universel du climat UTCI (Universal Thermal Climate Index) .....	19
I- Conclusion :.....	21

## **CHAPITRE II : Impact de l'ombrage sur le confort thermique extérieur**

II-Introduction :.....	22
II-1-Les études de référence :.....	23
II-1-1- Etude de Middel, Selover, Hagen, et al (2016) :.....	23
II-1-1-1- Site d'étude :.....	23
II-1-1-2- Impact de l'ombre sur le confort thermique :.....	24
II-1-1-3- Conclusions :.....	26
II-1-2- Etude de S. Ridha, Stéphane Ginestet, et Sylvie Lorente (2018) :.....	27
II-1-2-1- Zone D'étude :.....	27
II-1-2-2- La Configuration Modèle :.....	28
II-1-2-3- Scenarios :.....	28
II-1-2-4- Résultat De L'analyse De Confort Thermique Extérieur :.....	31

II-1-2-5- Conclusions :.....	33
II-1-3- Etude de Ruey-Lung Hwang,Tzu-Ping Lin,Andreas Matzarakis (2011) :	33
II-2-Conclusion :.....	34

### **CHAPITRE III : Présentation de cas d'étude**

III-Introduction :.....	35
III-1- Situation géographique :.....	36
III-2- Les différents paramètres climatiques :.....	37
III-2-1- La température :.....	37
III-2-2- L'humidité relative :.....	38
III-2-3- La vitesse des vents :.....	38
III-2-4- Les précipitation :.....	39
III-3- Site d'étude, place Thagaste / Souk Ahras / Algérie : .....	40
III-4- Choix de l'échantillon :.....	41
III- Conclusion :.....	41

### **CHAPITRE IV : Simulation numérique**

IV-Introduction :.....	42
IV-1- Les modèles de simulation numériques :.....	42
IV-1-1- Méthode par discrétisation spatiale :.....	42
IV-1-2-Méthode Par paramétrisation :.....	43
IV-2- Description du logiciel ENVI-met :.....	43
IV-3- déroulement de la simulation :.....	44
IV-3-1- Les données d'entrée pour le modèle :.....	44
IV-3-2- Scénarios :.....	45
IV-4-Evaluation du confort thermique :.....	47
IV-4-1- Vote moyen prévisible (PMV) :.....	47
IV-4-2-Facteur d'ouverture au ciel (SVF) :.....	48
IV-5-Analyse des résultats de simulation :.....	49
VI-5-1- les paramètres microclimatiques simulés :.....	50
VI-5-1-1- La température de l'air (T air) :.....	50
VI-5-1-2- Température moyenne radiante (Mrt) :.....	51
IV-5-1-3- Vote Moyen Prévisible (PMV) :.....	52
IV-5-1-4- L'indice thermique universel du climat (UTCI) :.....	53
IV-Conclusion :.....	54

Conclusion générale :.....	55
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> :.....	57
<b>ANNEXE</b> :.....	61

## Liste des figures :

### CHAPITRE I :

Figure I.1 : Les différents paramètres déterminant le confort thermique (Source : Perrineau, 2013).....	3
Figure I.2 : Homéothermie de l'homme. (Source: Szócs, 2005).....	05
Figure I.3 : Isolation thermiques des vêtements (source : Mazari,2012).....	07
Figure I.4 : Les différents phénomènes d'échange de chaleur entre l'individu et son environnement (Source : Grignon-Mass, 2010).....	08
Figure I.5 : Correspondance entre le PPD et le PMV..... (Source : <a href="http://www-energie2.arch.ucl.ac.be">http://www-energie2.arch.ucl.ac.be</a> ,2015)	14
Figure I.6 : Classification des valeurs du PMV selon neuf échelles de confort (Source : Bruse, 2015).....	15
Figure I.7 :Schéma des principaux paramètres de l'UTCI (Source :Blazejczyk. Ketal, 2013).....	20

### CHAPITRE II :

Figure II.1 : Situation géographique de la ville de Tempe dans le comté de Maricopa, Arizona, États-Unis (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	24
Figure II.2 : Distribution de fréquence (en pourcentage) des votes subjectifs sur la sensation thermique saisonnière (TSV) pour les échantillons d'enquête ombragés et exposés au soleil; votes de sensation thermique moyenne saisonnière (MTSV), soleil vs ombre (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	26
Figure II.3 : quartier de la rue Haïfa (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	27
Figure II.4 :3D de l'image satellite pour le district de la rue haifa (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	27
Figure II.5 : Plan de la rue principale avec la distribution de la végétation pour Modèle de base simulé Par ENVI-Mét. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	28
Figure II.6 : Vue en perspective du modèle de base simulé par ENVI-réuni. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	28
Figure II.7 :2D pour le modèle de base (BM) de Haifa Street District simulée	

par ENVI rencontré. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	29
Figure II.8 :2D pour le modèle herbe et les arbres (GT) de Haïfa Street District simulée. par ENVI-Met. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	29
Figure II.9 :2D pour les pergolas autour des bâtiments (PAB) de la rue Haïfa District simulé par ENVI-Met (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	30
Figure II.10 :Le passage ombragé pour les piétons. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	30
Figure II.11 : Vue en perspective pour le modèle pergolas pour les piétons avant que les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas simuler par ENVI Met. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	30
Figure II.12 :2D pour le modèle pergolas pour les piétons avant que les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas simulés par environnement-rencontré. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	30
Figure II.13 :2D pour le modèle des pergolas pour les piétons après les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas (SJP) simulés par ENVI rencontré. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	31
Figure II.14 : La trajectoire (AB) du piéton dans la zone urbaine. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	31

### **CHAPITRE III :**

Figure III.1 : Situation géographique de la wilaya de souk ahras (Source : fr.wikipedia.org 2019).....	36
Figure III.2 : 3D de l'image satellite pour le district de la place Thagaste. (source : Google earth 2019).....	40
Figure III.3 : la place Thagaste de Souk Ahras (source : auteur 2019).....	40

### **CHAPITRE IV :**

Figure IV.1 : Diagramme de flux des données (Source : Knodel, 2012).....	44
Figure IV.2 : 2D pour Le premier scénario de la place simulée par ENVI. Met (source : auteur 2019).....	46
Figure IV.3 : 2D pour Le second scénario de la place simulée par ENVI. Met (source : auteur 2019).....	47

Figure. IV 4 : (a) L'implantation des arbres permet le passage des rayons solaires ; (b) et (c) un vrai masque aux rayons solaires et ce qui a été adopté dans notre conception ; (d) présente la qualité de l'ombre

Figure IV.5 : Représentation du facteur d'ouverture au ciel (SVF) pour les deux scénarios. (source : auteur 2019).....

## Liste des tableaux :

### CHAPITRE I :

Tableau I.1 : Métabolisme thermique et énergie mécanique. (Source : eduscol.education.fr ,2015).....	6
Tableau I-2 : valeurs du PMV selon l'échelle de Fanger (Source :.....	13
Tableau I.3 : Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort. (Source : Bruse, 2015).....	15
Tableau I.4 : Valeurs du PET selon neuf échelles de confort (Source : Athamna, 2013).....	16
Tableau I.5 : Température perçue. (Source : Musy., 2008).....	18
Tableau I.6 : Grille d'appréciation de l'UTCI (Source : Boko et al, 2013)...	20

### CHAPITRE II :

Tableau II.1 : (a) Des échantillons indépendants t- testent les votes de sensation thermique des répondant sombrés artificiellement et naturellement. (b) Échantillons indépendants t- tests pour les votes de sensation thermique des répondants ombragés et exposés au soleil (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).....	25
--	----

### CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Moyennes mensuelles de la température de l'air pendant (2018) (Source : fr.tutiempo.net, 2019).....	37
Tableau III.2 : Moyennes mensuelles de l'humidité de l'air pendant (2018) (Source : fr.tutiempo.net, 2019).....	38
Tableau III.3 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent pendant (2018) (Source : fr.tutiempo.net, 2019).....	38
Tableau III.4 : Moyennes mensuelles des précipitations pendant (2018) (Source : fr.tutiempo.net, 2019).....	39

### CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : les principaux paramètres introduits au fichier *.cf.....	45
Tableau IV.2 : Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort. (Source : Bruse, 2015).....	58

## Liste des Graphes :

### CHAPITRE II :

Graphe II.1 : Distribution de la température de l'air à midi au niveau de 1,5 m pour le chemin(AB) des piétons.(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).	31
Graphe II.2 : Humidité spécifique à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour le trajet (AB) des piétons. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)	32
Graphe II.3 : PET à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour la trajectoire (AB) des piétons.(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)...	32
Graphe II.4 : PMV à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour la trajectoire (AB) des piétons.(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)...	33

### CHAPITRE III :

Graphe III.1 : Moyennes mensuelles de la température de l'air pendant (2018)(Source : Auteur 2019).....	37
Graphe III.2 : Moyennes mensuelles de l'humidité de l'air pendant (2018) (Source : Auteur 2019).....	38
Graphe III.3 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent pendant (2018) (Source : Auteur 2019).....	39
Graphe III.4 : Moyennes mensuelles des précipitations pendant (2018) (Source : Auteur 2019).....	39

### CHAPITRE IV :

Graphe IV.1 : Distribution de la température de l'air à midi pour le chemin (AB). (Source : Auteur, 2019).....	50
Graphe IV.2 : la température moyenne radiante à midi pour le chemin (AB). (Source : Auteur, 2019).....	51
Graphe IV.3 : Valeur de PMV à midi pour la trajectoire (AB). (Source : Auteur, 2019).....	52
Graphe IV.4 : Valeur d'UTCI à midi pour la trajectoire (AB). (Source : Auteur, 2019).....	53

# **INTRODUCTIONGENERAL**

## ❖ Introduction :

Dans les villes actuelles, il existe de nombreuses formes d'espace extérieur pour les résidents à utiliser, comme les parcs, les places, les rues piétonnes et des terrains de sport. L'efficacité du service de l'espace extérieur est fortement affectée par le confort thermique. Lorsque le sentiment de la population pour l'environnement thermique est dans la gamme acceptable de confort, les gens ont tendance à rester plus à l'extérieur, alors qu'ils vont rester plus courts quand ils se sentent mal à l'aise M. Nikolopoulou, S. Lykoudis(2007). Ainsi, le niveau de confort thermique est d'une importance vitale pour l'espace extérieur

Les Conditions microclimatiques dans les espaces extérieurs sont influencées par: climat régional, l'environnement, la végétation et des objets artificiels. Le microclimat est l'un des paramètres qui affectent le confort thermique dans les espaces extérieurs M. Nikolopoulou et al(2006). D'autres paramètres appartiennent à la catégorie humaine : facteurs âge, le sexe, physiologiques et psychologiques qui incluent l'expérience passée, les attentes, l'adaptation, l'état de santé et aussi aspects comportementaux (isolation des vêtements, le taux métabolique, -ex) A. Middel et al(2016).

Un nombre plus élevé de la population mondiale vivant dans les villes et le développement urbain défavorable a affecté le microclimat et les conséquent les conditions de confort dans des environnements en plein air. En particulier, dans les zones urbaines la hausse des températures en été peut conduire à l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU), qui est un phénomène bien connu dans les villes contemporaines.

Ce phénomène provoque une diminution de la qualité de vie dans les villes développées et en développement partout dans le monde S. Anupriya(2016). L'importance de ces problèmes dans les villes conduit, à l'échelle mondiale, à une augmentation du nombre d'études réalisées au cours des années de récente sur microclimat urbain. Par conséquent, le confort thermique en milieu urbain est devenu une importante recherche dans le domaine de l'aménagement urbain durable L. Chen, E. Ng(2012).

le nombre, la variété et la fréquence des activités dans les espaces ouverts dépendent des conditions de confort thermique changeantes au cours de la journée F. Salata et al(2015). Les espaces extérieurs avec des conditions de confort thermique favorables ont un impact positif sur l'habitabilité d'une ville et peuvent jouer un rôle important dans l'amélioration de ses qualités de vie environnementale et sociale L. Martinelliet al(2015) D. Lai et al(2014).

De cette façon, il est possible de contribuer à une augmentation des activités économiques dans un environnement urbain mieux et plus vivable MA Ruiz, FR Correa(2015).

En conséquence, ces espaces peuvent avoir un effet positif sur l'image de la ville M. Nikolopoulou(2001). Appropriées conditions de confort thermique dans les espaces urbains extérieurs peut contribuer à la prévention de l'isolement social, aidant ainsi les gens à socialiser I. Tumini (2016) S. Oliveira, H. Andrade(2007).

### ❖ **Problématique :**

De nombreuses études ont montré que le rayonnement solaire a une influence critique sur le confort thermique. Lin (2013) a observé les gens dans un parc à Taiwan et a constaté que le rayonnement solaire et l'environnement thermique affecté le nombre total de personnes dans le parc.

Les résultats de Letizia Martinelli (2015) suggèrent une relation significative entre la situation de l'ombre et le nombre des participants. L'ombre affecte sur la répartition de la population au fil du temps et de leur décision sur laquelle une partie de la place pour se déplacer. Cela suggère que le rayonnement solaire a une grande influence sur le confort thermique des personnes.

Notre objectif est alors de déterminer le rôle de l'ombrage sur le confort thermique extérieur en été.

Afin d'atteindre notre objectif d'étude, on pose les questions suivantes :

**- Quel est l'impact de l'ombrage sur le confort thermique d'été dans les espaces extérieur ?**

### ❖ **Hypothèse :**

Plusieurs auteurs ont déjà souligné l'importance de l'ombre pour réduire le stress thermique dans les climats chauds (Johansson et Emmanuel 2006 , Lin et al. 2010 ; Vanos et al. 2016 ).

Afin de répondre à la question qui ont précédé la présente étude propose l'hypothèse suivante:

- Les ombres ont une incidence sur le confort thermique d'été dans les espaces extérieurs.

### ❖ **Objectifs de la recherche :**

Cette étude a pour objectif de quantifier l'impact de l'ombre sur le confort thermique extérieur à l'aide de mesures de confort permettant de prendre en compte les facteurs environnementaux et non environnementaux ayant une incidence sur le confort thermique.

L'objectif de notre étude est:

Examiner l'impact de l'ombre sur le confort thermique extérieur d'été.

❖ **Méthodologie :**

Ce travail de recherche a pour objectif de contribuer à l'analyse de l'impact de l'ombrage sur les conditions microclimatiques et notamment sur le confort thermique extérieur.

La simulation sera effectuée au cours de la saison très chaude par le logiciel envi met le logiciel peut analyser les structures urbaines complexes et d'autres environnements (bâtiment et arbres). Il ne nécessite que des données météorologiques de base (température de l'air, l'humidité de l'air, le type de la vitesse du vent et ciel) pour le calcul de flux de rayonnement, la température et les indices thermiques communs (PMV, UTCI, et). Il est pris en considération les coordonnées géographiques du site étudié.

Nous allons faire une simulation par un logiciel «Envi-met», sur des sites exposés au soleil ainsi que des sites ombragés.

❖ **Structure du mémoire :**

Notre recherche s'organise en deux parties principales :

La première partie est consacrée à la familiarisation avec les différents concepts propres à notre objet d'étude. Cette première phase sera développée en trois chapitres :

**Le chapitre I: Confort thermique dans les espaces extérieur**

À pour objectif de définir la notion du confort thermique dans les espaces extérieurs, ses éléments et ses indices.

**Le chapitre II: Impact de l'ombrage sur le confort thermique extérieur**

présentation de plusieurs recherches et expériences sur l'analyse de l'effet de l'ombrage sur le confort thermique dans les espaces extérieurs.

La deuxième partie sera développée en deux chapitres :

**Le chapitre III: Présentation de cas d'étude.**

Où nous allons établir une présentation du cas d'étude et des caractéristiques climatiques de la zone d'étude.

**Le chapitre V: Simulation numérique.**

Nous allons faire une simulation par un logiciel «Envi-met», sur plusieurs configurations.

Après les résultats et l'analyse nous pourrons ensuite donner des recommandations.

# **CHAPITRE I :(Partie théorique)**

## **Confort thermique dans les espaces publics extérieurs**

## **I-Introduction :**

Dans les milieux bâtis, Le confort thermique est un critère primordial pour la santé et le bien être des individus. Il constitue une exigence essentielle pour laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires.

La notion de confort dans l'espace extérieur diffère de celle qui prévaut dans l'espace intérieur : les conditions sont contrôlables dans l'espace intérieur, tandis que dans l'espace extérieur, ces conditions sont soit changeantes ?, soit non contrôlables. En conséquence les attentes de l'individu par rapport à l'ambiance extérieure se situent dans une gamme plus étendue que celles de l'ambiance thermique intérieure.

La notion du confort dans les espaces urbains extérieurs, est difficilement quantifiable en raison de l'interaction de plusieurs paramètres environnementaux et personnels.

Depuis les dernières décennies, de nombreux travaux de recherche ont été conduits sur les conditions de confort et plusieurs indices de confort thermique ont été établis. Ces indices ont pour but de décrire l'effet de la combinaison des différents paramètres climatiques sur la sensation de bien-être vis-à-vis au confort thermique.

Ce présent chapitre traitera des connaissances de base en matière de confort thermique, de ses critères et des méthodes d'évaluation, particulièrement sur les indices.

### **I-1- Confort thermique :**

d'après Nicol et al (2012), cité par Musy (2014), « *Souvent l'homme est à la recherche dans son environnement, non seulement du confort mais aussi d'un agrément thermique : ce qui est particulièrement valable dans une ambiance dynamique comme par exemple des espaces urbains, ouverts ou semi-ouverts au ciel.* »

Il n'existe pas de définition universelle du confort thermique ; on trouve diverses descriptions dans la littérature, en premier lieu appliqué aux espaces intérieurs :

- Selon Ashrae (1993), cité par Musy (2014) « *le confort thermique est atteint lorsque l'individu exprime une satisfaction au sujet de son environnement.* »
- Selon Depecker (1989), cité par Musy (2014), ambiance confortable « *est une ambiance pour laquelle l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle-sans mettre en jeu de manière perceptible ; et donc désagréable ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid.* »
- Selon Galeou et al (1989), cité par Musy (2014), le confort thermique de l'être humain correspond à « *une motivation simple mais permanente qui le pousse à chercher, voire créer, certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en terme d'agrément ou de désagrément.* »
- Selon Fanger (1972) ; le confort thermique a été défini comme étant « *l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique* ».

«Le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par un système de facteurs **physiques**, **physiologiques** et **psychologiques**, conduisant l'individu à exprimer le **bien être** de son état»

### **I-2-Les paramètres du confort thermique :**

Selon Givoni (1969) et Fanger (1970), cité par Reiter (2007), il y a six paramètres à prendre en considération lors de l'évaluation du confort thermique physiologique d'un être humain. Ces six paramètres permettent de quantifier le bilan thermique d'une personne. (Reiter, 2007).

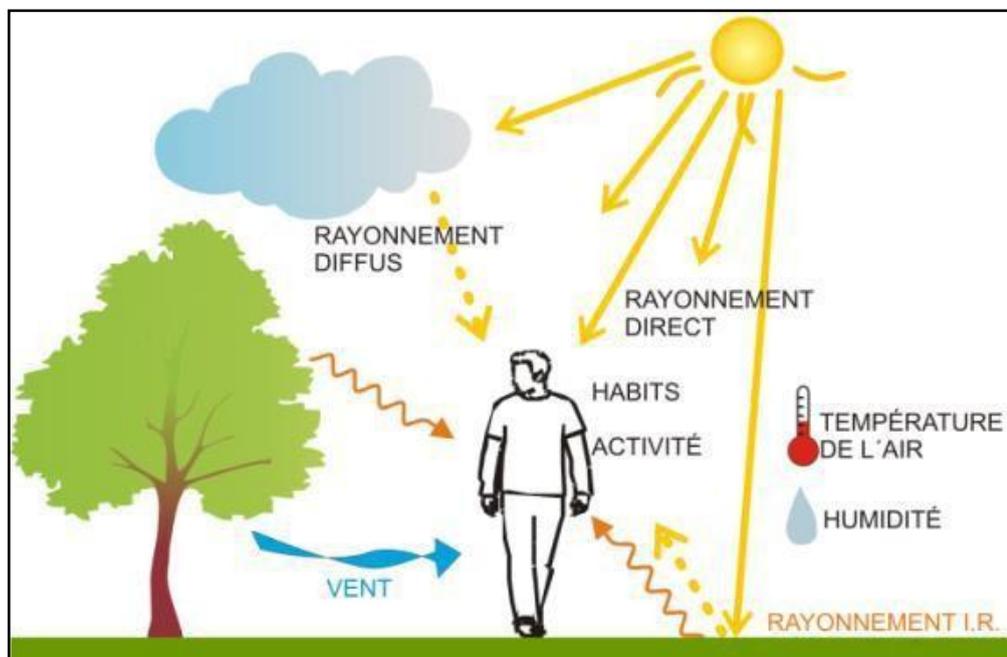
### I-2-1- Paramètres relatifs à l'environnement :

Il y a quatre paramètres microclimatiques importants :

- Température radiante moyenne
- Température de l'air
- Humidité de l'air
- Vitesse de l'air

A ces paramètres, il faut ajouter les paramètres caractérisant les espaces extérieurs :

- Les apports solaires (directs, indirects et diffus)
- La température de la voûte céleste
- Les phénomènes naturels : la pluie, la grêle, la neige, etc. (Vinet, 2010)



**Figure I.1** : Les différents paramètres déterminant le confort thermique

(Source : Perrineau, 2013)

#### I-2-1-1- La Température moyenne radiante (TMR) :

Est définie comme la température moyenne des surfaces environnantes, elle inclut les flux de courte et de grande longueur d'onde, influençant ainsi le bilan énergétique. Elle a un impact considérable sur la sensation du confort thermique en milieu urbain. (Tsoka, 2011)

### **I-2-1-2- Température de l'air :**

La température de l'air, ou température ambiante, joue un rôle important sur le confort thermique. Elle affecte l'échange de chaleur entre le corps humain et son environnement par convection et rayonnement. (Haj Hussein, 2012)

### **I-2-1-3- Humidité relative :**

Le taux d'humidité de l'air influence principalement les échanges évaporatoires entre l'individu et son environnement au niveau de la peau et de la respiration. Plus l'air n'est saturé, plus l'échange par évaporation est restreint. Haj Hussein, 2012)

L'impact de l'humidité de l'air est plus important dans les conditions où les températures sont élevées car l'évaporation représente le moyen le plus efficace de perte de chaleur au-delà d'une certaine limite proche de 37 °C. (Szócs, 2005)

### **I-2-1-4- La vitesse de l'air:**

Elle correspond au mouvement de l'air par rapport à un Objet. La vitesse de l'air varie dans le temps et l'espace. (Hollmuller et al, 2003)

- Elle détermine l'échange de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau et par conséquent agit sur la production de la sueur (Szócs, 2005)

### **I-2-1-5- Rayonnement solaire :**

Selon Givoni (1978), cité par Ouameur (2007), Le rayonnement solaire est un paramètre qui influence le confort thermique dans les espaces extérieurs. Il possède à la fois des effets thermiques et biologiques sur l'homme. Biologiquement, le corps est affecté par la partie ultra-violet (U.V) du spectre tandis que l'effet thermique est dû aux rayons visibles et infrarouges. Dans les espaces extérieurs, il est beaucoup plus difficile de déterminer  $T_{mrt}$  due aux larges variations du rayonnement de différentes sources. Le corps humain peut recevoir le rayonnement solaire, direct et diffus, aussi bien que le rayonnement réfléchi à partir des parois des bâtiments et du sol. (Kitous, 2012).

## I-1-2- Paramètres relatifs à l'individu :

### I-1-2-1- Mécanismes de thermorégulation :

L'homme est un homéotherme qui doit maintenir sa température centrale entre 36.8 °C et 37.2°C. Le métabolisme produit en permanence de la chaleur, de manière plus ou moins importante en fonction de son activité.

La chaleur produite dans le noyau central se transmet jusqu'à la peau par convection et conduction, où elle est dissipée par évaporation, rayonnement, conduction et convection. L'enveloppe du corps qui comprend la peau se situe autour du noyau central du corps. Elle est plus épaisse dans une ambiance froide en créant une couche isolante importante tandis que dans une ambiance chaude elle est moins importante. (Szócs, 2005)

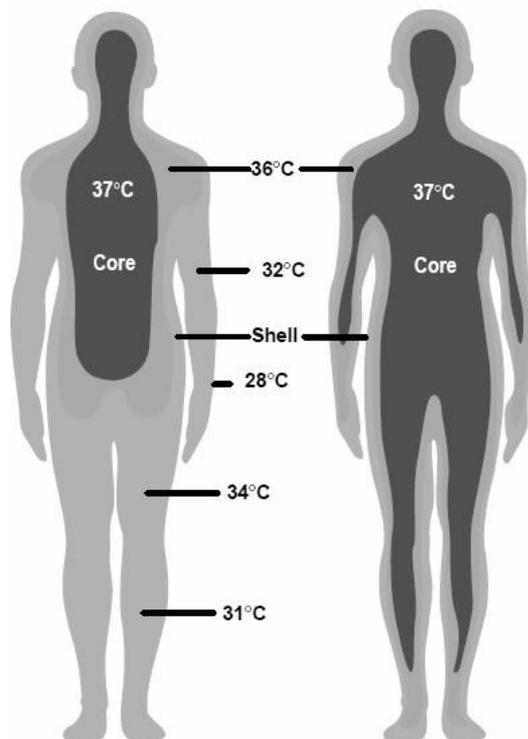


Figure I.2 : Homéothermie de l'homme. (Source : Szócs, 2005)

### I-1-2-2- Le métabolisme et les échanges thermiques :

La production de l'énergie métabolique de l'être humain provient principalement de la réaction d'oxydation du glucose. Cette énergie prend alors deux formes :

- **métabolisme basal** dû aux procédés biologiques continus et non conscients ; pour maintenir la température du corps ;
- **métabolisme musculaire**, interne pour soutenir le squelette et externe pour transmettre des forces aux objets. (Szöcs, 2005)

Le métabolisme est évalué indirectement, il est mesuré expérimentalement à partir du volume d'oxygène consommé. Plus l'effort physique est intense et plus les muscles consomment d'oxygène apporté par la respiration.

Pour quantifier le niveau d'activité d'une personne, les spécialistes utilisent comme unité, le met (de métabolisme). 1 met est égal à 1 fois le métabolisme basal (assis, au repos). L'unité de Met est égale à **58.15 W/m<sup>2</sup>**. (Moujalled, 2007).

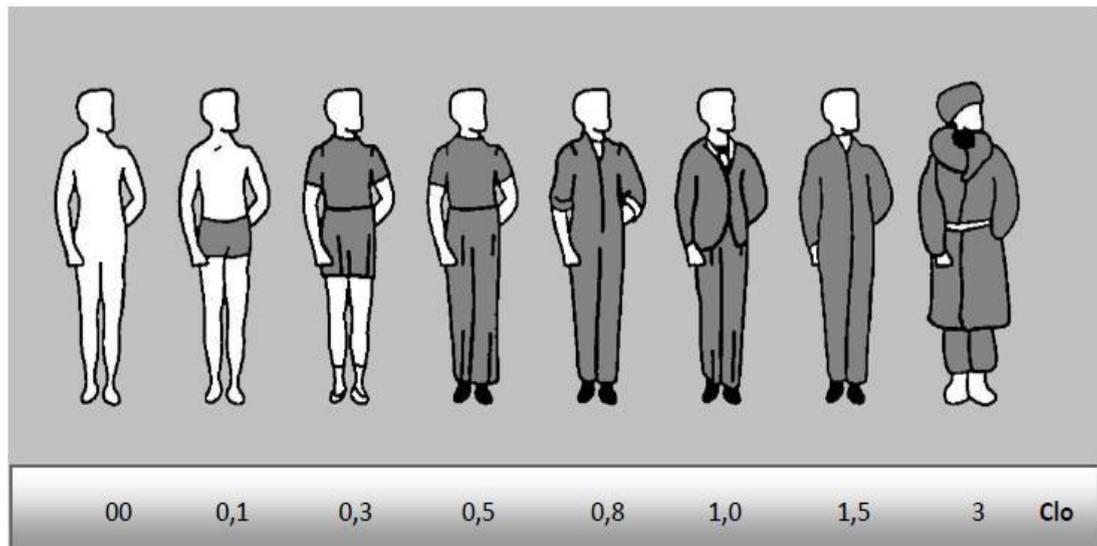
Activité	Niveau d'activité (nombre de fois le métabolisme basal)	Puissance pour une personne moyenne (70 kg et 1,70 m)[W]
Sommeil	0,7	7 4
Couché, au repos	0,8	8 4
<b>Assis, au repos</b>	<b>1</b>	1 0 6
Assis, travail mental	1,1	1 1 6
Debout, au repos	1,2	1 2 7
Debout, activité légère (achat, laboratoire, industrie légère)	1,6	1 6 9
Debout, activité moyenne (vente, travail ménager, travail sur machine)	2	2 1 1
Debout, activité soutenue (travail de garage)	3	3 1 7
Marche 4 km/h	2,2	2 3 2
Course 10 km/h	7,6	8 0 0
Course 25 km/h	43	4 500
Course 30 km/h	105	11 000
Football	10,3	1 0 8 0
Nage 1,6 km/h	5,4	5 7 0

**Tableau I.1** : Métabolisme thermique et énergie mécanique. (Source : eduscol.education.fr ,2015).

### I-1-2-3- les vêtements :

**Le vêtement :** représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

- Les transferts de chaleur à travers les tissus se font par conduction. À la surface extérieure, les échanges se font avec l'environnement par convection, rayonnement et évaporation. La température du vêtement est calculée au moyen d'un bilan de flux thermiques qui traversent le vêtement, ce bilan est caractérisé par une résistance thermique globale  $I_{cl}$  exprimée en clo (de *clothing*). 1 clo = 0,155 [m<sup>2</sup>. °C/W] désigne l'habillement intérieur d'hiver. (Zekri, 2010).

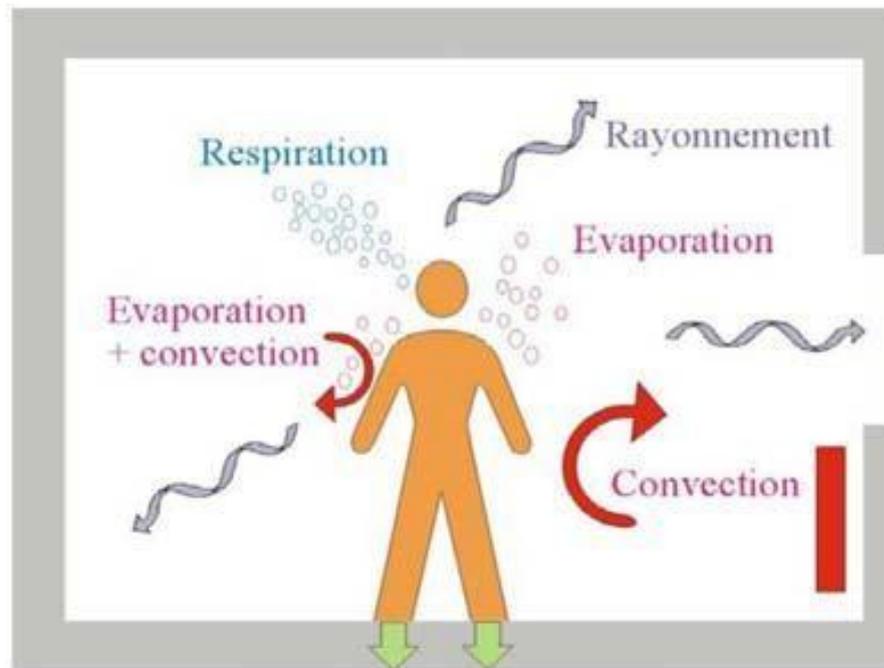


**Figure I.3 :** Isolation thermiques des vêtements (source : Mazari, 2012).

La nature du tissu, la coupe des vêtements, l'activité et la posture du sujet influencent aussi les différents modes de transferts thermiques avec l'environnement. (Zekri, 2010).

### I-3- Les phénomènes d'échange de chaleur :

L'homme échange de l'énergie avec son environnement extérieur selon quatre mécanismes la conduction, la convection et le rayonnement, qui sont des échanges de chaleur sensible, et l'évaporation qui est un échange de chaleur latente. Les échanges respiratoires sont une association d'échanges par convection et par évaporation. (Grignon-Mass, 2010)



**Figure I.4 :** Les différents phénomènes d'échange de chaleur entre l'individu et son environnement  
(Source : Grignon-Mass, 2010)

### **I-3-1- La conduction :**

Est le phénomène d'échange de chaleur par le contact entre la peau et les éléments solides elle est provoquée par la différence de température avec lesquelles la peau est en contact. Lorsque l'homme échange de la chaleur par conduction mais que seules de petites zones corporelles sont concernées (par exemple la surface inférieure du pied pour un homme debout), ces échanges sont alors négligeables. (Moujalled, 2007)

### **I-3-2-La convection :**

Est le phénomène d'échange de chaleur entre le corps et l'air entourant. Il est lié à la différence de température entre la peau et l'air ambiant mais aussi aux vitesses de l'air au voisinage du corps. Si l'air est plus froid que la surface cutanée, il s'échauffe au contact de la peau. Il se déplace alors vers le haut car il est plus léger que l'air ambiant. (Moujalled, 2007) Il existe deux catégories de convection :

- **Convection naturelle :** le mouvement de l'air est lié à son réchauffement à proximité du corps.
- **Convection forcée :** l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe. (Szócs, 2005)

### **I-3-3- Rayonnement :**

Désigne le phénomène d'émission ou de transmission d'énergie sous formes d'ondes ou de particules entre deux corps. Le corps peut également subir les effets du rayonnement solaire direct ou réfléchi de son environnement extérieur ou intérieur. (Grignon-Mass, 2010).

On distingue deux catégories selon la bande d'émission : **Rayonnement de grande longueur d'onde GLO (infrarouge) :**

Provient de l'énergie absorbée et réémise par l'atmosphère et celle provenant des surfaces environnantes. Les échanges supposent l'implication de la propre émission de chaleur du corps et celle des surfaces environnantes. (Szócs, 2005).

**Rayonnement de courte longueur d'onde CLO (rayonnement solaire) :**

Ce flux de chaleur inclut la partie de l'énergie du rayonnement solaire incident qui est directement absorbée par la peau. (Vinet, 2000)

### **I-3-4- Les échanges de chaleur latente : l'évaporation**

Est le phénomène d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen principal pour évacuer la chaleur dans les ambiances chaudes par évaporation de la sueur à la surface cutanée. Le système de thermorégulation détermine La quantité de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps. (Moujalled, 2007)

### **I-3-5- Les échanges de chaleur par respiration :**

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur avec l'air inhalé. Cette chaleur est échangée sous forme sensible de par le phénomène de convection entre l'intérieur du corps et l'air est sous forme latente par évaporation.

Ces échanges s'effectuent donc selon des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire. (Moujalled, 2007)

### **I-3-6- Equation du bilan thermique :**

La chaleur métabolique produite dans le corps peut-être dissipée dans l'environnement ambiant via les phénomènes présentés (convection, respiration...) ou stockée à l'intérieur du corps. Le bilan thermique de l'homme peut alors s'écrire sous la forme de l'équation (ASHRAE, 1997). (Moujalled, 2007)

$$M - W = (C + R + K + E_{sk}) + (E_{res} + C_{res}) + S_{sk} + S_c$$

Avec (les flux de chaleurs sont calculés par unité de surface corporelle) :

$C_{res}$  : échanges de chaleur par convection lors de la respiration [ $W/m^2$ ]

$E_{res}$  : échanges de chaleur par évaporation lors de la respiration [ $W/m^2$ ]

$E_{sk}$  : échanges de chaleur par évaporation [ $W/m^2$ ]

$C$  : flux de chaleur convectif, en Watt par  $m^2$  de surface d'échange [ $W/m^2$ ]

$K$  = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du peau,  $W/m^2$

$M$  : métabolisme [ $W/m^2$ ]

$W$  : travail extérieur [ $W/m^2$ ]

$R$  : flux de chaleur par rayonnement [ $W/m^2$ ]

$S_{sk}$  : chaleur stockée dans la peau [ $W/m^2$ ]

$S_c$  : chaleur stockée à l'intérieur du corps [ $W/m^2$ ]. (Moujalled, 2007)

## **I-4- Méthodes expérimentales d'évaluation du confort thermique :**

Du fait de la complexité de la notion de « confort thermique », son étude mobilise depuis plus d'un demi-siècle des chercheurs de différents milieux scientifiques. Les principales approches expérimentales développées pour caractériser le confort thermique sont :

### **I-4-1- Approche physique :**

Elle est basée sur l'analyse du bilan thermique du corps humain et prend en compte les transferts de chaleur et de masse ainsi que la façon dont la thermorégulation intervient dans la modulation de ces échanges. (Musy, 2008)

- Ce modèle se concentre sur la détermination des valeurs limites de certains paramètres physiques, relatifs aux conditions ambiantes et jugées pertinentes pour la caractérisation du confort thermique : température de l'air, vitesse de l'air, hygrométrie ...

Elle prend également en compte la tenue vestimentaire et l'activité des individus placés dans ces conditions. (Petit et al, 2003)

### **I-4-2- Approche physiologique :**

Elle se concentre sur la détermination de valeurs limites de paramètres physiologiques, notamment les températures cutanées et la température interne. Étudie les réponses subjectives à l'environnement thermique ainsi que les actions involontaires, qui se produisent

quand le corps n'est pas en état de neutralité, comme la transpiration et le frisson.

(Petit et al,2003).

#### **I-4-3- Approche psychologique ou subjective :**

Cette approche est basée sur les réponses d'individus placés dans des conditions expérimentales données. On leur fait alors remplir des grilles d'évaluation dans lesquelles on retrouve des questions relatives aux jugements perceptifs (sensation thermique), Aux jugements affectifs (confort, préférence), à l'acceptabilité, à la tolérance... (Petit et al, 2003).

#### **I-5- L'évaluation du confort thermique :**

Pour évaluer le confort thermique à l'extérieur, des indices spécifiques ont été définis. Ils intègrent les facteurs qui définissent l'environnement thermique humain et prévoient la réponse des individus. (Musy, 2008)

Sigrid Reiter dans sa thèse de doctorat (2007) a mentionné les méthodes quantitatives existantes actuellement pour évaluer le confort thermique extérieur qui peuvent être classifiées en cinq groupes :

##### **I-5-1- Indices de l'équation du bilan thermique :**

Basée sur un modèle complexe du corps humain et sur l'évaluation des paramètres climatiques, couplant une équation de bilan de chaleur avec un modèle simplifié d'évaluation de la température radiante moyenne. Ces modèles ont été élaborés pour évaluer différents scénarios climatiques pour des activités et un habillement standard. Les indices les plus fréquents sont : Physiologique Equivalent Température PET (Höppe 1999), New Effective Température ET new (Gagge et al. 1971), Standard Effective Température SET et OUT\_SET intégrés à un modèle de température rayonnante extérieure OUT\_MRT (J. Pickup, R. de Dear, 2000).

##### **I-5-2- Indices de l'équation du bilan d'énergie :**

Reposée sur un modèle simplifié du corps humain : Température perçue (PT), un modèle qui correspond au modèle de Fanger associé à un modèle d'évaluation du rayonnement extérieur mais qui ne tient pas compte du vent (Vinet, Jendrintzky), et aussi (COMfort FormuLA - COMFA (Brown et Gillespie) : est un modèle simplifié intégrant l'ensemble des paramètres climatiques et urbains bien qu'il ait été initialement développé à partir d'interviews dans des paysages ruraux.

**I-5-3- des modèles graphiques :** très simplifiés mais d'usage très rapide regroupant les différents paramètres climatiques. Citons la charte bioclimatique d'Olgay.

**I-5-4- les indices climatiques empiriques :** qui créent des corrélations entre quelques paramètres climatiques spécifiques. Ils sont généralement élaborés pour certains climats spécifiques. Tels que l'indice de refroidissement éolien Wind-chill index ou l'indice de l'inconfort.

**I-5-5- les indices psycho-socio-climatiques :**

Ils sont élaborés à partir d'interviews réalisées dans des espaces publics urbains. Ils créent une corrélation entre une perception subjective et des variables microclimatiques (par exemple, Actuel Sensation Vote -ASV-, satisfaction indexes,...) ou un indice de confort (Nikolopoulou, SAGAcité).

**I-6- Les indices d'évaluation du confort thermique :**

**I-6-1- PMV (Vote Moyen Prévisible– Predicted Mean Vote):**

Fanger a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique pour déterminer les conditions du confort thermique.

Cette méthode est la plus utilisée pour l'évaluation du confort thermique. Ce dernier est calculé en fonction des facteurs environnementaux, ainsi que des valeurs de métabolisme et de tenues vestimentaires.

- 1 - Les facteurs environnementaux : la température de l'air, l'humidité de l'air, la température de l'environnement rayonnant et la vitesse de l'air.
- 2 - Le Métabolisme.
- 3 - Les propriétés thermo- hygrométriques du vêtement. (Moujalled, 2007)

Fanger a intégré les valeurs du PMV dans une échelle décrivant les sensations physiques du confort. Cette échelle de 7 degrés allant de (-3) (très froid) à (+3) (très chaud). (Vinet, 2000).

La situation de confort est obtenue pour un PMV compris entre  $(-0,5)$  et  $(+0,5)$ . Ces limites décrivent une situation définie comme neutre où l'individu ne ressent ni sensation de chaud ni sensation de froid. A partir de ces valeurs, l'échelle de Fanger représentée dans le tableau qui suit indique qu'un PMV négatif correspond à des environnements froids, et un PMV positif, à des ambiances thermiquement chaudes.



**Tableau I-2 :** valeurs du PMV selon l'échelle de Fanger (Source :

Cet indicateur, basé sur le modèle d'équilibre énergétique, a fait l'objet de plusieurs modifications visant à l'adapter pour une utilisation dans les milieux extérieurs. Parmi ces modifications nous citons celle de Jendritzky et al (1979).

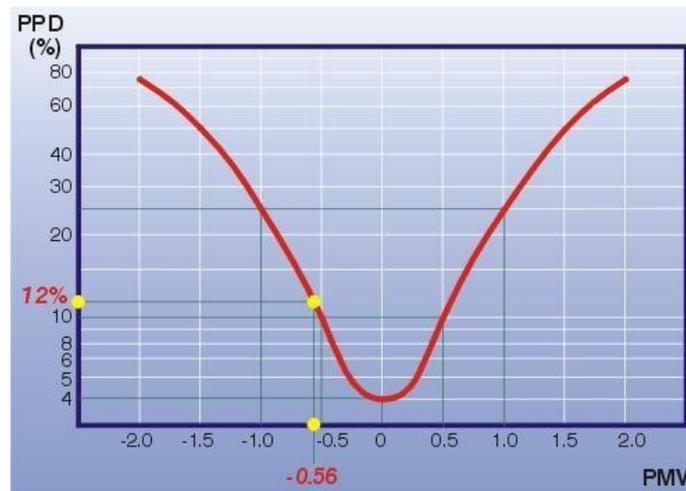
L'indice PMV a été modifié afin de pouvoir prendre en compte les apports solaires ainsi que l'hétérogénéité des conditions extérieures. Jendritzky a modifié l'indice de Fanger pour qu'il soit applicable aux conditions climatiques extérieures tout en tenant compte de l'influence du rayonnement solaire absorbé par une personne debout. Cette nouvelle approche est aussi connue comme *Klima Michel Model*. (Tsoka, 2011).

Elle permet de quantifier le confort ressenti dans un environnement extérieur par une personne standard : de sexe masculin, 35 ans, 1,75m de taille, 75 kg de poids et de 4 km / h comme vitesse de marche à (2,3 remplies). En ce qui concerne les vêtements, il est choisi de manière sélective entre 0,5 et 1,75 clo (été et hiver ensembles de vêtements allemands d'été et d'hiver respectivement). (Monteiro, 2005)

**Pourcentage prévisible d'insatisfaits (Predicted Percentage Dissatisfied- PPD-) :**

Donne en fonction de l'indice PMV d'une situation thermique précise, permet de prévoir le pourcentage des personnes insatisfaites par rapport à la situation. Connaissant PMV, la figure ci-après permet d'évaluer directement PPD, qui peut être calculée par:

$$PPD = 1 - 0.95 \cdot \exp(-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2)$$



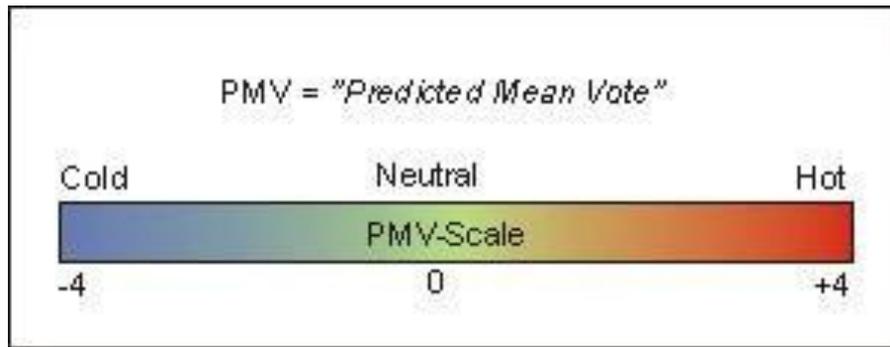
**Figure I.5 :** Correspondance entre le PPD et le PMV

(Source : <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be>, 2015)

A cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire 100% des individus en réunissant des conditions "idéales". Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum.

Pour une valeur de PMV=0, il y a encore 5 % d'insatisfaits. Ce nombre monte à 10 % pour un PMV = ± 0.5 et 20 % pour un PMV = ± 0.84.

Michael Bruse, dans ses travaux effectués lors de l'actualisation de son programme de simulation a adopté neuf échelles de confort propres aux espaces extérieurs (figure n°6), l'échelle de PMV est définie entre -4 (très froid) et +4 (très chaud) où 0 est le (confort) Valeur thermique neutre:



**Figure I.6 :** Classification des valeurs du PMV selon neuf échelles de confort

(Source : Bruse, 2015)

PMV	Description
Moins de -4	Extrêmement Froid
Entre -3 et -4	Moyennement Froid
Entre -2 et -3	Frais
Entre -1 et -2	Légèrement frais
Entre -1 et +1	Neutre
Entre +1 et +2	Légèrement tiède
Entre +2 et +3	Tiède
Entre +3 et +4	Moyennement chaud
Plus de +4	Extrêmement chaud

**Tableau I.3 :** Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort. (Source : Bruse, 2015)

### I-6-2- La température physiologique équivalente (PET) :

PET est l'indice le plus utilisé pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs. L'indice PET est défini comme la température de l'air (intérieur ou extérieur), dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire.

Dans son calcul, l'indice PET est basé sur le modèle d'énergie équilibré de Munich pour Les individus MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals). Le climat intérieur de référence est défini par :

- la température radiante moyenne est égale à la température de l'air, ( $T_{mrt} = T_a$ ),
- la vitesse de l'air égale à 0,1 ms<sup>-1</sup>,

– la pression de vapeur d'eau est fixée au 12 hPa (environ une humidité relative de 50% à  $T_a = 20^\circ\text{C}$ ). (Athamna, 2013)

Le tableau ci-dessous indique la perception thermique d'un individu "moyen" avec un métabolisme de travail de 80 W (activité légère) et une résistance de transfert thermique de vêtements de 0,9 clo. (Athamna, 2013)

<b>Perception thermique ressentis par un individu</b>	<b>Valeurs PET en C°</b>
<b>très chaud</b>	<b>&gt;41</b>
<b>chaud</b>	<b>35-41</b>
<b>chaud modéré</b>	<b>29-35</b>
<b>légèrement chaud</b>	<b>23-29</b>
<b>confortable</b>	<b>18-23</b>
<b>légèrement frais</b>	<b>13-18</b>
<b>froid modéré</b>	<b>8-13</b>
<b>froid</b>	<b>4-8</b>
<b>très froid</b>	<b>&lt; 4</b>

**Tableau I.4 :** Valeurs du PET selon neuf échelles de confort (Source : Athamna, 2013)

### **I-6-3- L'indice de température standard effective en espaces extérieurs (OUT\_SET\*) :**

Cet indice est basé sur l'indice SET\* (température standard effective) de Gagge et al. (1971), intègre le modèle OUT\_MRT de la température radiante moyenne en extérieur. (Musy, 2008) Le calcul de l'indice SET\* est effectué dans un environnement isotherme ( $T_a = T_{Tmrt}$ ,

HR=50%,  $v_a = 0.15$  m/s) telle qu'une personne dans cet environnement ayant une isolation de vêtement standard (0,6clo et 1,2met) ait la même température moyenne de peau ( $T_p$ ) et la même moiteur ( $\omega$ ) que dans l'environnement réel complexe. (Vinet, 2010)

Le modèle OUT\_MRT calcule la température de la surface d'une zone hypothétique autour d'un sujet debout qui échangerait le même rayonnement infrarouge avec le sujet que le

rayonnement dans toutes les longueurs d'ondes dans l'environnement solaire et infrarouge réel. (Musy, 2008)

#### **I-6-4- Le vote de sensation effective (Actual Sensation Vote) -ASV- :**

D'après Nikolopoulou et al (2004), dans le contexte du projet européen RUROS, les conditions du confort thermique extérieur ont été évaluées à travers des enquêtes sur terrain dans 14 villes européennes afin d'élaborer une nouvelle méthode simplifiée pour l'évaluation du confort thermique extérieur. Cet indice de confort thermique extérieur est basé sur près de 10 000 interviews réalisées dans les espaces publics de centres urbains.

Les paramètres microclimatiques mesurés pendant les interviews et utilisés dans l'élaboration d'un indice de confort sont : la température de l'air ( $T_{air}$ , °C), le rayonnement solaire global ( $Sol$ , W/m<sup>2</sup>), la vitesse du vent ( $V$ , m/s) et l'humidité relative ( $RH$ , %). (Nikolopoulou et al, 2004)

L'équation de (ASV) est donnée comme suit :

$$ASV = 0.049 T_{air} + 0.001 Sol - 0.051 V + 0.014 RH - 2.079$$

Cette équation se différencie d'une autre par les poids (coefficients) attribués aux variables d'entrées ainsi que par le coefficient de corrélation ( $R^2$ )

La sensation thermique effective d'un individu  $y$  est considérée égale à son choix sur une échelle de cinq niveaux allant de « très froid » à « très chaud ». La sensation thermique effective d'un individu  $y$  est considérée égale à son choix sur une échelle de cinq niveaux allant de « très froid » à « très chaud ». (Reiter, 2007)

L'échelle ASV (Actual Sensation Vote) utilisée comporte les cinq niveaux suivants:

-2 = très froid,

-1 = froid,

0 = neutre,

1 = chaud,

2 = très chaud. (Reiter, 2007)

### I-6- 5- La température perçue :

La Température Perçue (en °C), est définie pour évaluer le stress et le confort thermique du corps humain. (Staiger et al.1997).

C'est la température de l'air dans un environnement de référence dans lequel la perception de la chaleur et/ou du froid serait la même que dans les conditions réelles (Jendritzky et Nuebler, 1981).Le modèle repose sur le bilan d'énergie du corps humain, basé sur l'équation de confort de Fanger couplé avec les flux solaires

L'environnement de référence est défini par:

- La température radiante moyenne égale à la température de l'air
- Vitesse d'air réduite ( $v = 0,1\text{m.s}^{-1}$ )
- Emissivité de la peau ou des vêtements : 0,97
- Coefficient d'absorption solaire : 0,7

L'évaluation thermo-physiologique est réalisée pour un homme « standard » dont le taux métabolique est 2,3 Met. L'homme standard utilisé peut adapter ses vêtements entre vêtements d'été (0,50 clo) et d'hiver (1,75 clo). (Musy, 2008)

Cet indice est basé sur le Predicted Mean Vote (PMV) de Fanger qui permet d'évaluer le confort thermique. C'est la norme allemande VDI 3787 qui définit la température perçue. (Perrineau ,2013)

Température perçue [°C]	Perception thermique
$PT \geq 38$	Extrêmement chaud
$32 \leq PT < 38$	Très chaud
$26 \leq PT < 32$	Chaud
$20 \leq PT < 26$	Légèrement chaud
$0 < PT < 20$	Confortable
$-13 < PT \leq 0$	Légèrement frais
$-26 < PT \leq -13$	Frais
$-39 < PT \leq -26$	Froid
$PT \leq -39$	Très froid

**Tableau I.5 :** Température perçue. (Source : Musy., 2008)

### **I-6-6- L'indice de sensation thermique (TSI) :**

Selon Givoni et al (2003), cité par (Zekri, 2010), (*TSI*) a été élaboré à partir d'une enquête menée dans la ville de Yokohama au Japon. Givoni et ses collègues ont interrogé les sujets dans différentes situations climatiques en utilisant un questionnaire sur leurs sensations thermiques (*TSI*). L'équation de (*TSI*) est donnée comme suit :

$$TSI = 1.7 + 0.1118 Ta + 0.0019 Ray - 0.322 Va - 0.0073 RH + 0.0054 Ts$$

Où :

- Température de l'air ( $T_a$ , °C)
- Rayonnement solaire ( $Ray$ ,  $Wm^{-2}$ )
- Vitesse du vent ( $V_a$ ,  $ms^{-1}$ )
- Humidité relative ( $RH$ , %)
- Température du sol ( $T_s$ , °C)

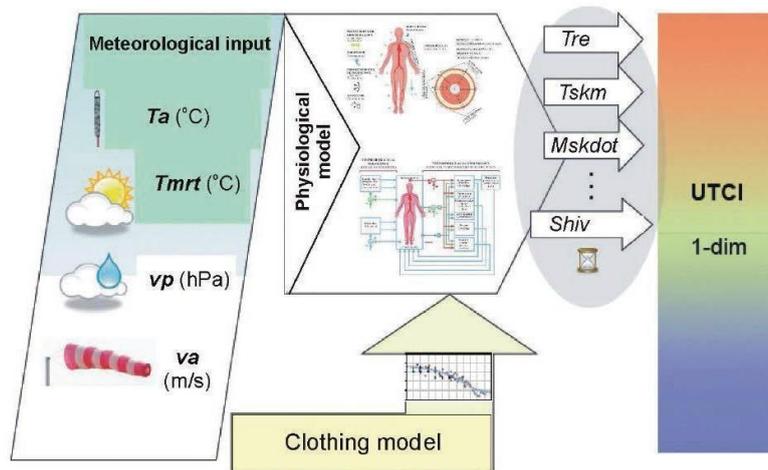
Notons que les variables qui affirment le plus significativement la sensation thermique sont celles relatives à la température de l'air (corrélée positivement à *TSI*) et la vitesse du vent (corrélée négativement à *TSI*), les autres variables (Rayonnement solaire, température du sol et humidité relative) ayant un rôle moins important dans l'évaluation de *TSI*.

La sensation thermique (*TS*) était mesurée sur une échelle de 1 (très froid) à 7 (très chaud) où la valeur 4 représente la neutralité (Zekri, 2010)

### **I-6-7- L'Indice thermique universel du climat UTCI (Universal Thermal Climate Index) :**

En 2000, l'Universal Climate thermique Index (UTCI) a été élaboré par une commission créée par le Société internationale de biométéorologie (ISB, 2004). La commission, présidée par Jendritzky. L'objectif principal était de créer un indice qui soit exacte dans tous les climats, les saisons et les échelles, et être indépendant des caractéristiques personnelles telles que l'âge, le sexe, activités spécifiques et de l'habillement. (Walls et al, 2015).

L'UTCI est défini comme la température d'air ( $T_a$ ) de l'état de référence provoquant la même réponse physiologique comme l'état réel. (Medeouk et al, 2015).



**Figure I.7** : Schéma des principaux paramètres de l'UTCI (Source : Blazejczyk. K et al, 2013)

Les variables d'entrées de l'UTCI sont des paramètres climatologiques (température de l'air (en °C) ; Mrt : température radiante moyenne (en °C) ; v : vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol (en ms-1) ; HR : Humidité relative de l'air (en %).) et des données physiologiques (résistance thermique liée à l'habillement et température radiante moyenne).

La formule mathématique de l'indice climato-thermique universel se présente ainsi qu'il suit. (Medeouk et al, 2015)

$$UTCI = 3.21 + 0.872 t + 0.245 Mrt - 2.507 v - 0.0176 HR$$

Avec t : température de l'air (en °C) ; Mrt : température radiante moyenne (en °C) ; v : vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol (en ms-1) ; HR : Humidité relative de l'air (en %).

**L'Indice thermique universel du climat (UTCI)** est exprimé en une température ambiante équivalente (° C) d'un environnement de référence fournissant la même réponse physiologique d'une personne de référence comme l'environnement réel. (Walls et al, 2015)

UTCI (°C)	Niveau de stress physiologique	Sensation thermique
> 46	Stresse thermique extrême	Torride
de +38 à +46	Stress thermique très fort	Très chaud
de +32 à +38	Stress thermique fort	Fortement chaud
de +26 à +32	Stress thermique modéré	Chaud
de +9 à + 26	Pas de stress	Confortable
de 0 à +9	Léger stress dû au froid	Légèrement frais
de -13 à 0	Stress modéré dû au Froid	Frais
de -27 à -13	Fort stress dû au froid	Froid
de -40 à -27	Très fort stress dû au froid	Fortement froid
< -40	Stress extrême dû au froid	Très froid

**Tableau I.6** : Grille d'appréciation de l'UTCI (Source: Boko et al, 2013)

## **I-Conclusion :**

La notion de confort urbain est relativement subjective et peut être influencée par des critères physiologiques ou culturels de chaque individu.

De nombreuses recherches ont été amenés à s'intéresser au confort thermique de l'individu vis-à-vis à son environnement pour en se rendre compte à l'importance de l'effet du confort thermique sur la santé et la productivité des hommes.

L'étude du confort dans l'espace extérieur se traduit comme l'étude des échanges thermiques qui se produisent entre le corps humain et son environnement.

L'environnement thermique est caractérisé par des paramètres physiques (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et le taux métabolique et l'habillement pour établir son état thermique de l'individu.

Les paramètres climatiques influent le confort thermique par l'intermédiaire des trois modes de transferts thermiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

Le confort thermique participe au bien-être et au confort en général et se définit selon plusieurs variables : physiologiques (thermorégulation, homéothermie), physiques (création et échanges de chaleur avec l'environnement extérieur), psychologique (sensation de confort).

Pour évaluer le confort thermique à l'extérieur, des indices spécifiques ont été définis. Ils intègrent les facteurs qui définissent l'environnement thermique humain et prévoient la réponse des individus.

## **CHAPITRE II :(Partie théorique)**

### **Impact de l'ombrage sur le confort thermique extérieur**

## **II-Introduction :**

Les espaces ouverts publics offrent des lieux d'événements culturels, de loisirs et de promouvoir les relations sociales informelles entre les citoyens. Espaces extérieurs qui réussissent à promouvoir le confort et invitent les gens à rester à l'extérieur.

En outre, les conditions climatiques et le confort thermique sont très importants pour l'amélioration de la qualité environnementale de la ville.

La qualité des espaces publics urbains présente un intérêt majeur et il est reconnu que ces espaces peuvent contribuer à une bonne qualité de vie en milieu urbain.

Les ombres ont une incidence sur les environnements thermiques extérieurs et, par conséquent, sur la perception thermique des personnes dans les espaces extérieurs.

Dans ce chapitre, nous allons présenter plusieurs recherches et expériences sur l'analyse de l'effet de l'ombrage sur le confort thermique dans les espaces extérieurs.

## **II-1- les études de référence :**

### **II-1-1-Etude de Middel, Selover, Hagen, et al (2016):**

Cette étude examine l'impact de l'ombrage de la canopée et des arbres sur le confort thermique par le biais d'observations météorologiques et d'enquêtes de terrain dans une rue piétonnière du campus Tempe de l'Arizona State Université.

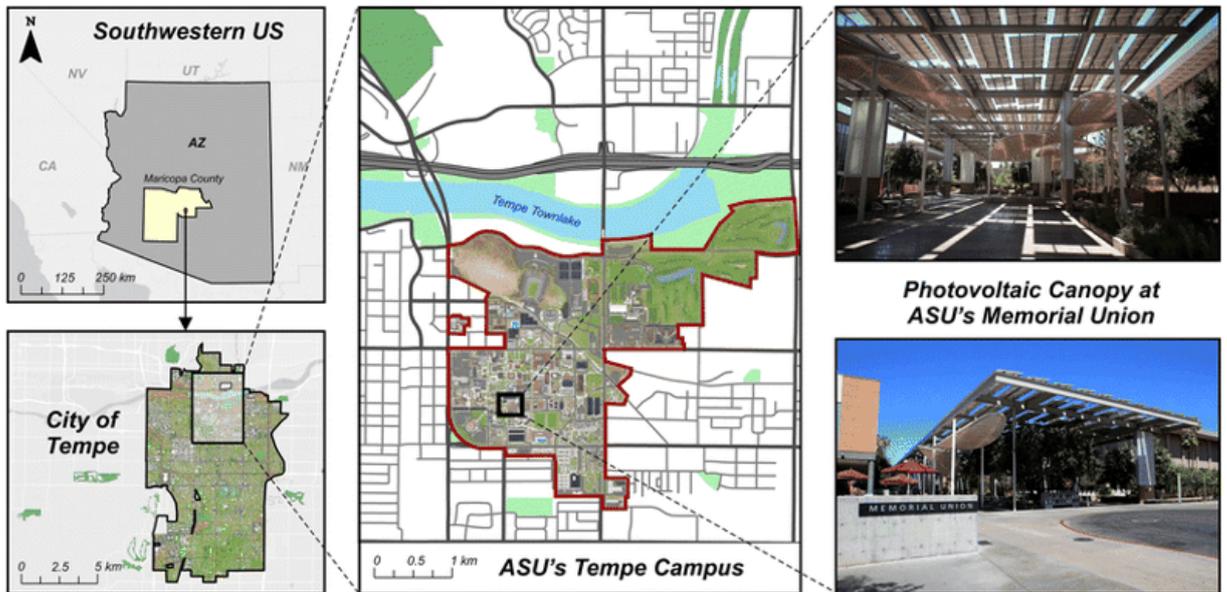
Au cours d'une année, certains jours clairs et calmes, représentatifs de chaque saison, ils ont effectué des transects météorologiques toutes les heures de 7h00 à 18h00 et interrogé 1284 personnes sur leur perception, leur confort et leurs préférences thermiques. L'ombre a abaissé les votes de sensation thermique d'environ 1 point sur une échelle différentielle sémantique de 9 points, augmentant le confort thermique en toutes saisons sauf l'hiver.

Le type d'ombre (arbre ou auvent solaire) n'a pas eu d'effet significatif sur le confort perçu, ce qui suggère que les nuances artificielles et naturelles sont tout aussi efficaces dans les climats chauds et secs. La température du globe expliquait 51% de la variance des votes de sensation thermique et était le seul prédicteur météorologique significatif sur le plan statistique. Les facteurs non météorologiques importants comprenaient l'adaptation, le vote en faveur du confort thermique, les préférences thermiques, le sexe, la saison et l'heure.

Une régression de la sensation thermique subjective sur une température physiologique équivalente a donné une température neutre de 28,6 ° C. La plage de confort acceptable est comprise entre 19,1 ° C et 38,1 ° C, avec une température préférentielle de 20,8 ° C. Les répondants exposés à une température supérieure à la température neutre se sentaient plus à l'aise s'ils avaient été climatisés 5 minutes avant l'enquête, ce qui indique une réponse tardive aux conditions extérieures.

#### **II-1-1-1- Site d'étude :**

La ville de Tempe est située à 33,4294 ° N, 111,9431 ° W, à 360 m au-dessus du niveau de la mer, dans la région de la East Valley de la région métropolitaine de Phoenix dans le comté de Maricopa, en Arizona, aux États-Unis (figure II.1 ).



**Figure II.1 :** (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

(De gauche à droite ) Situation géographique de la ville de Tempe dans le comté de Maricopa, Arizona, États-Unis; Le campus Tempe de l'Arizona State Université; Les structures solaires à baldaquin procurent de l'ombre à la Memorial Union sur le campus

### **II-1-1-2- Impact de l'ombre sur le confort thermique :**

Pour évaluer l'impact de l'ombre sur la sensation thermique subjective, nous avons étudié le TSV pour les réponses ombrées et exposées au soleil selon la saison. Tout d'abord, nous avons testé les différences de TSV entre les types d'ombrages (nuances artificielles et naturelles), en comparant les valeurs de TSV des sujets à l'ombre des arbres avec les réponses à l'ombre du couvert solaire. Un test d'échantillons indépendants n'a révélé aucune différence significative dans le TSV saisonnier signalé sous la canopée photovoltaïque et sous les arbres. L'effet du type d'ombrage n'était significatif en aucune saison (tableau II.1a ), ce qui indique que les ombres naturelle (arbre) et artificielle (photovoltaïque) ont le même effet sur la perception thermique. Par conséquent, les analyses ultérieures ne feront pas de distinction entre les types d'ombres et étudieront uniquement les réponses ombrées et celles exposées au soleil

a) TSV	Nuance photovoltaïque		Ombre des arbres		t	df	p (2 queues)	Diff. Moyenne
	Signifier	$\sigma$	Signifier	$\sigma$				
Été	2,00	1,32	2,41	1,52	-1,71	250	0,890	-0,41
Tomber	-0.13	1,27	0,03	1,35	-0,72	265	0,477	-0.16
Hiver	-1.62	1.10	-1,48	1,53	-0,58	222	0,565	-0.14
Printemps	0,26	1,36	0,82	1,07	-1,65	223	0,100	-0,56
b) TSV	Ombre		Soleil		t	df	p (2 queues)	Diff. Moyenne
	Signifier	$\sigma$	Signifier	$\sigma$				
Été	2,06	1,35	2,93	1,29	4,33	304	0,000 **	0,87
Tomber	-0.11	1,29	0,99	1,40	6,94	358	0,000 **	1.10
Hiver	-1,61	1,13	-0,90	1,66	4,58	335	0,000 **	0,70
Printemps	0,31	1,35	1,26	0,89	4,80	274	0,000 **	0.95

**Tableau II.1** (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

La figure II.2 illustre la distribution de fréquence du TSV au soleil et à l'ombre, regroupée par saison. En été, 50,0% des sujets se sont sentis chauds à chauds, 20,3% très chauds, alors que seulement 3,2% se sont ( légèrement ) refroidis. Les réponses pendant les saisons de transition automne et printemps se concentrent autour du TSV neutre. En hiver, la plupart des sujets se sentaient légèrement froids à froids (77,4%). En comparant les réponses exposées au soleil et à l'ombre, l'ombre a diminué le confort perçu d'environ 1 point sur l'échelle de 9 points pour toutes les saisons.

Les différences de TSV sont statistiquement significatives (Tableau II.1b). Les résultats montrent que l'ombre atténue le stress thermique en été, réduisant le TSV de chaud en chaud. Pendant les périodes de transition, l'ombre améliore le confort perçu d'un climat légèrement chaud à neutre, mais les conditions deviennent plus inconfortables en hiver, le TSV changeant de froid en froid.

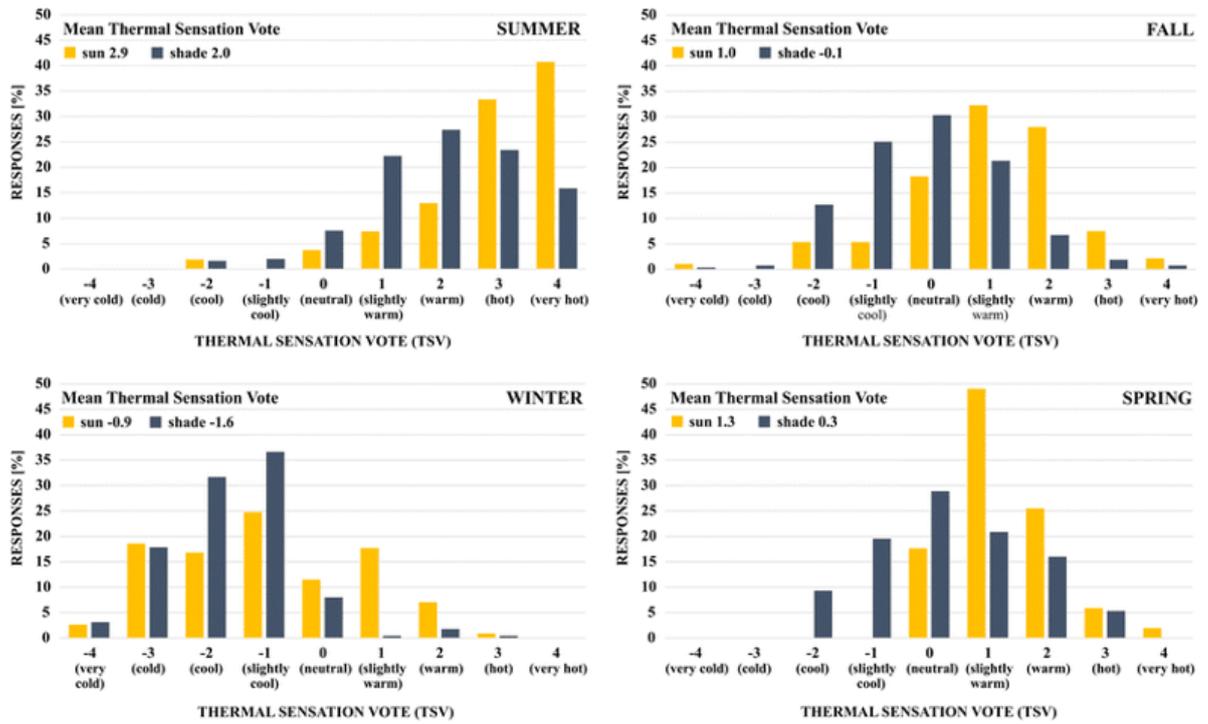


Figure II.2 : (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

La distribution de fréquence (en pourcentage) des votes subjectifs sur la sensation thermique saisonnière (TSV) pour les échantillons d'enquête ombragés et exposés au soleil; votes de sensation thermique moyenne saisonnière (MTSV), soleil vs ombre

### II-1-1-3- Conclusions :

Les réactions à la sensation thermique ne variaient pas de manière significative selon le type d'ombre, ce qui suggère que l'ombre artificielle et l'ombre naturelle sont tout aussi efficaces pour atténuer le stress dû à la chaleur dans les climats chauds et secs. Les résultats de l'enquête révèlent que le corps humain ne peut pas résoudre les différences météorologiques entre les types d'ombrages lorsque le niveau d'humidité est faible. Cette découverte majeure ouvre de nouvelles voies pour des stratégies de gestion active de l'ombrage dans les climats chauds et secs afin d'atténuer le stress thermique des citoyens.

L'exposition à une chaleur extrême dans les villes du désert est un risque particulièrement préoccupant en raison de risques pour la santé. Elle devrait encore augmenter à l'avenir avec l'urbanisation rapide prévue et des vagues de chaleur plus intenses, plus fréquentes et plus durables. L'atténuation du stress thermique extérieur par le biais de l'ombre de la canopée photovoltaïque est particulièrement utile dans les régions sèches, parce que les structures photovoltaïques ne nécessitent pas d'irrigation et offrent le co-bénéfice d'une production d'électricité à potentiel solaire élevé.

### **II-1-2-Etude de S. Ridha, Stéphane Ginestet, et Sylvie Lorente (2018) :**

Cette étude porte sur l'étude des stratégies d'atténuation possibles pour assurer la façon dont nous pourrions améliorer le confort thermique au niveau piétonnier pour une zone urbaine avec la conception occidentale complexe (immeubles de grande hauteur, un grand espacement entre les bâtiments, la géométrie du canyon asymétrique, et le manque de végétation) .

Il s'ensuit quatre scénarios différents pour évaluer le rôle des éléments de végétation tels que les arbres, l'herbe et les différents motifs d'ombrage. L'évaluation a été réalisée dans la journée la plus chaude en été. Pour chaque scénario, la température moyenne de rayonnement, humidité spécifique, la température de l'air et la distribution de la vitesse du vent ont été analysées à l'aide du logiciel rencontré ENVI.

Le confort thermique est évalué en utilisant le thermique PET index (Physiological Température équivalent) et Vote Moyen Prévisible (PMV).

Les résultats montrent que l'indice PET peut être réduit à 10,4 °C, la température peut être diminuée d'environ 2,4 °C et PMV à 3.

L'étude montre comment les facteurs urbains tels que le ratio d'aspect, le couvert végétal, ombrages et la géométrie du canyon sont des éléments cruciaux que les planificateurs urbains et les municipalités doivent prendre en compte, en particulier pour les nouveaux développements urbains.

#### **II-1-2-1-Zone D'étude**

Bagdad, la capitale de l'Irak, est située dans la partie centrale du pays sur les deux côtés du fleuve Tigre. Il se trouve sur la latitude et la longitude 43 Est 34 Nord. Le climat de la région de Bagdad est défini comme un hiver semi-aride, subtropical et continental, sec, chaud en été et frais. La température maximale enregistrée était de 50 °C à l'été



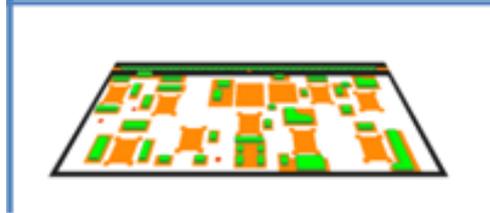
**Figure II.3 :** quartier de la rue Haïfa  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



**Figure II.4 :** 3D de l'image satellite pour le district de la rue haifa  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

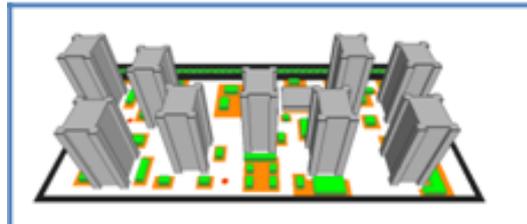
### II-1-2-2-La Configuration Modèle :

Les travaux de simulation d'enquête comparative mettent l'accent sur l'analyse du confort thermique au niveau des piétons dans quatre scénarios caractérisés par des stratégies de verdure, comme l'herbe, différents types d'arbres. En outre, deux modèles d'ombre différents ont été créés en assumant les pergolas autour des bâtiments. D'autres propositions pour l'ombrage sont créés pour les piétons qui arbres sur les deux côtés qui entourent les pergolas.



**Figure II.5 :** Plan de la rue principale avec la distribution de la végétation pour Modèle de base simulé Par ENVI-Met.

(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



**Figure II.6 :** Vue en perspective du modèle de base simulé par ENVI-réuni.

(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

### II-1-2-3-Scenarios :

Pour évaluer l'impact du modèle d'ombrages et de la végétation sur le confort des piétons thermique extérieure, quatre scénarios différents représentent les principales stratégies climatiques pour atténuer les effets des îlots de chaleur urbains. En plus du plan de cas de base, trois autres scénarios ont été simulés, les modèles sont les suivants:

- Modèle de base: le modèle de base (BM) est l'étude de cas de la zone urbaine (rue Haïfa), il y a très peu d'arbres (agrumes) sans végétation dans ce modèle (figure (II.5 et II.6). Fig. II.7 représente la configuration 2D pour le modèle de base simulé par ENVI-remplies.
- modèle de végétation: modèle herbe et les arbres (GT) a été pris autour des bâtiments, pour évaluer l'effet de la végétation dans la région sélectionnée. Sophora Japonica est supposé dans ce modèle avec un espace d'herbe autour de la zone urbaine. (Sophora Japonica), qui est l'arbre à tête ronde- avec des branches d'étalement, (4,5 à 9) m de haut.

Les jeunes branches et les rameaux sont densément pubescents peu . Fig. II.8 décrit 2D du modèle herbe et les arbres qui sont simulés par ENVI-remplies.

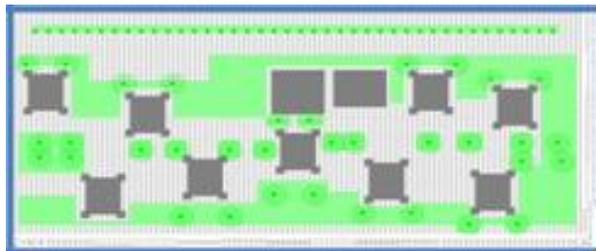
•modèle d'ombre (pergolas autour des bâtiments): (PAB) Ce modèle suppose que les pergolas sont imposées autour des bâtiments avec une hauteur de 4 m. Les arbres sont répartis autour de thèses pergolas définies comme Sophora Japonica. Fig. II.9 montre 2D du modèle d'ombre qui sont simulés par ENVI-met.

•Sophora Japonica autour des pergolas pour les piétons: ce modèle (SJP) a représenté le modèle qui a été proposé d'acquérir le confort thermique.

Les piétons et résoudre les problèmes du grand espacement entre les bâtiments. Fig. II.10 explique l'objectif de ce modèle pour fournir les ombrages continus pour les piétons par une grille de pergolas. arbres Sophora Japonica sur les deux côtés entourent les pergolas. Fig. II.11 montre la vue en perspective de ce modèle simulé par ENVI-Met. Figures. II.12 et II.13 représentent le modèle simulé avant et après que les arbres ont été distribués autour des pergolas pour la piétons.

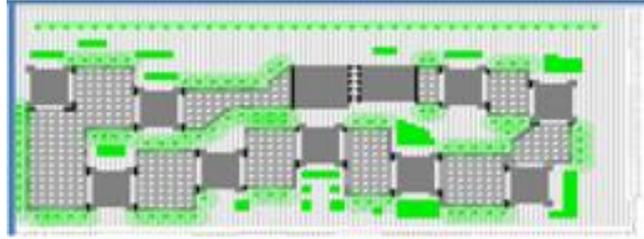


**Figure II.7 :** 2D pour le modèle de base (BM) de Haifa Street District simulée par ENVI rencontré.  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



**Figure II.8 :** 2D pour le modèle herbe et les arbres (GT) de Haifa Street District simulée par ENVI-Met.

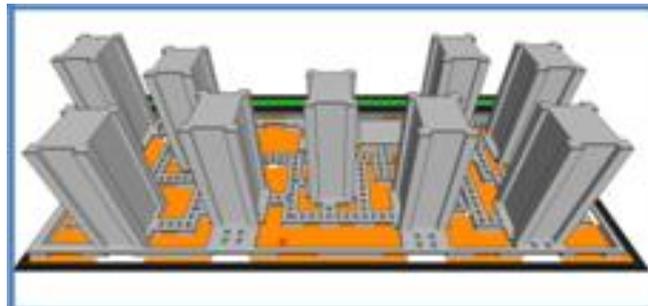
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



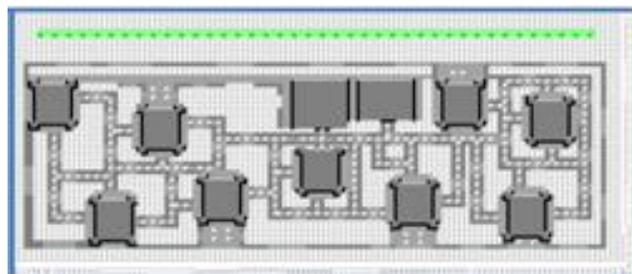
**Figure II.9 :** 2D pour les pergolas autour des bâtiments (PAB) de la rue Haïfa District simulé par ENVI-Met  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



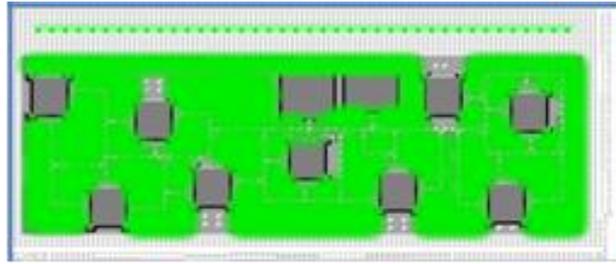
**Figure II.10 :** Le passage ombragé pour les piétons.  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



**Figure II.11:** Vue en perspective pour le modèle pergolas pour les piétons avant que les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas simulé par ENVI Met.  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)



**Figure II.12 :** 2D pour le modèle pergolas pour les piétons avant que les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas simulés par environnement-rencontré.  
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).

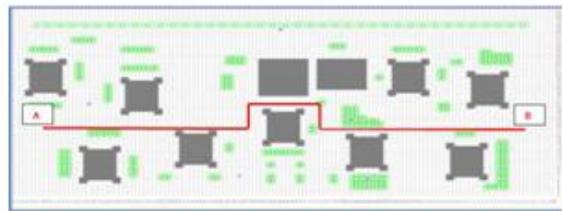


**Figure II.13 :** 2D pour le modèle des pergolas pour les piétons après les arbres Sophora Japonica ont été distribués autour des pergolas (SJP) simulés par ENVI rencontré.

(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).

#### II-1-2-4-Résultat De L'analyse De Confort Thermique Extérieur

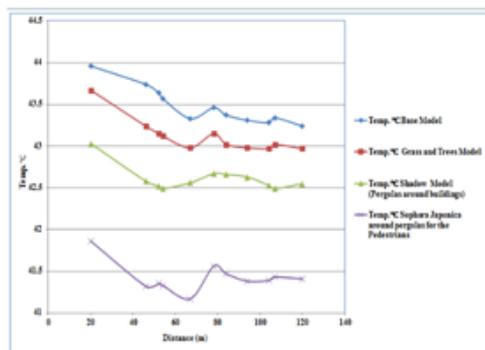
Ils analysent les conditions de confort thermique le long d'un chemin piétonnier reliant proposé tous les bâtiments estimés à midi. PET et PMV sont mesurés pour évaluer le confort thermique extérieur pour les piétons pour la zone urbaine sélectionnée. Un scénario de la passerelle qui est relié aux bâtiments dans la zone urbaine est simulé pour illustrer l'objectif des conditions thermiques transitoires des piétons. Le chemin (AB) observé sur la Fig. II.14 est d'environ 120 m de long.



**Figure II.14 :** La trajectoire (AB) du piéton dans la zone urbaine.

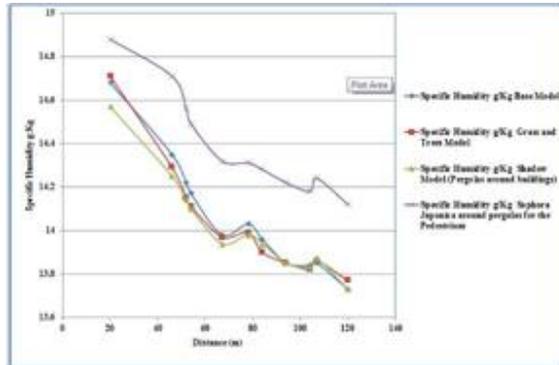
(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

Le modèle (SJP) a contribué à réduire au minimum la température de l'air le long des piétons variant de 1,83 à 2,42 °C comme représenté sur le graphe. II.1



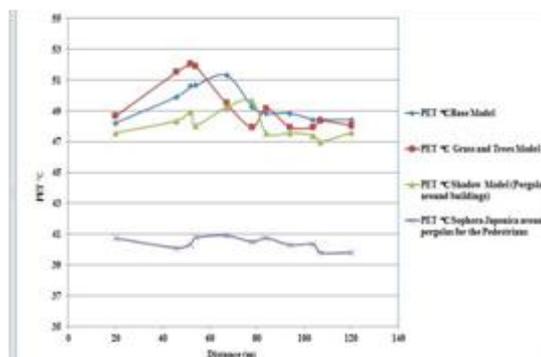
**Graphe II.1 :** Distribution de la température de l'air à midi au niveau de 1,5 m pour le chemin(AB) des piétons.(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016)

Graphe II.2 montre que les valeurs d'humidité spécifiques ont le plus haut niveau de Sophora Japonica autour des pergolas des piétons modèle (SJP).

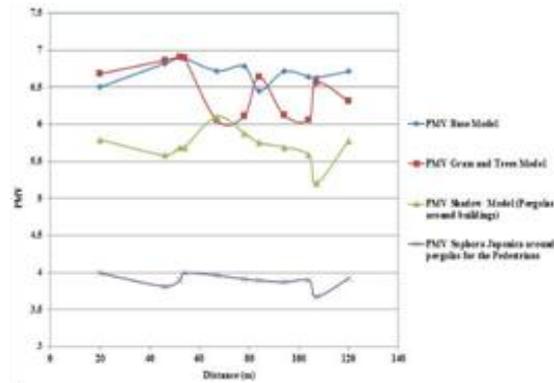


**Graphe II.2 :** Humidité spécifique à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour le trajet (AB) des piétons. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).

Selon les Graphes. II.3 et II.4, ils sont observé que l'ombrage des arbres pourrait influencer sur le confort thermique. Le Sophora Japonica autour pergolas pour le modèle de piétons (SJP) est la meilleure configuration pour améliorer le confort thermique. Nous avons obtenu une diminution des valeurs PET à partir du modèle de base atteint à 10,42 °C dans le trajet (AB) pour les piétons, et 3,01 des valeurs PMV.



**Graphe II.3:** PET à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour la trajectoire (AB) des piétons. (Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).



**Graphe II.4:** PMV à midi au niveau de 1,5 m au-dessus du sol pour la trajectoire (AB) des piétons..

(Source : Middel, Selover, Hagen, et al 2016).

### II-1-2-5-Conclusions

L'étude est menée pour évaluer la perception du confort thermique pour les deux indices PMV et PMT. Travaux de simulation sont effectués le jour le plus chaud en été.

Donc, les résultats ont révélé une diminution température d'environ 2,4 °C et 10.4 °C l'indice de PET pour le modèle (SJP) et réduire en PMV à 3.

La diminution maximale de la valeur de température moyenne de rayonnement atteint 35 °C. Ils affrontent les difficultés dans la conception occidentale dans une zone climat aride sans trajet (AB) des piétons.

La prise en considération le confort thermique pour les piétons en particulier dans une saison chaude en été. Immeubles de grande hauteur, des canyons asymétriques, le grand espacement entre les bâtiments, le manque de végétation et la perte de fonction d'ombrage jouent un rôle important. Les résultats finaux de l'étude pourraient déboucher sur des recommandations d'urbanisme pour les municipalités et les urbanistes.

### II-1-3-Etude de Ruey-Lung Hwang, Tzu-Ping Lin, Andreas Matzarakis (2011):

Comme l'ombrage, facteur important dans les environnements urbains, affecte les environnements thermiques et le confort thermique à long terme, cette étude a mené plusieurs expériences sur le terrain pour analyser les conditions thermiques extérieures dans les rues urbaines du centre de Taïwan.

Le modèle RayMan a été utilisé pour prédire le confort thermique à long terme à l'aide de données météorologiques sur une période de 10 ans.

Les résultats analytiques indiquent que les zones légèrement ombragées ont généralement des conditions de chaleur très fréquentes en été, en particulier à midi. Cependant, les endroits très ombragés ont généralement une température PET (basse température) physiologiquement équivalente en hiver.

L'analyse de corrélation révèle que le confort thermique est optimal lorsqu'un emplacement est ombragé au printemps, en été et en automne. En hiver, les conditions d'ombre basse peuvent contribuer à l'augmentation du rayonnement solaire; Ainsi, Le confort thermique est amélioré lorsqu'un endroit peu ombragé en hiver.

Ils suggèrent qu'un certain niveau d'ombrage soit le meilleur pour les rues urbaines et que des arbres ou des dispositifs d'ombrage devraient être utilisés pour améliorer l'environnement thermique d'origine.

## **II-2-Conclusion :**

Les activités humaines réalisées dans le milieu urbain interagissent avec les paramètres microclimatiques (rayonnement solaire, écoulements du vent, température de l'air et de surface), transformant ainsi le climat des villes. Les bilans thermiques et énergétiques des surfaces urbaines sont aussi modifiés entraînant ainsi un impact direct sur le confort des piétons en espaces extérieurs.

Dans ce présent chapitre, la lumière a été jetée sur quelques études analytiques et expérimentales récentes réalisées à travers le monde, comprenant l'interaction entre les paramètres climatiques et la configuration et l'aménagement urbain de l'espace en termes des conditions microclimatique et du confort thermique des piétons aux espaces extérieurs. Certains travaux de recherche se sont principalement appuyés sur l'investigation sur site, par contre d'autres, passent par l'expérimentation et la simulation numérique. Ainsi, nous avons exposé brièvement leurs résultats et synthèses qui peuvent être bénéfiques.

Ces études, nous ont permis d'avoir des schémas, des méthodes, des indicateurs pour déterminer la méthode et les paramètres les plus adaptés à nos buts.

# **CHAPITRE III :(Partie pratique)**

## **Présentation de cas d'étude**

### **III-Introduction :**

Dans ce chapitre, nous ferons une présentation de la ville de souk ahras sous un contexte dans lequel, nous allons effectuer notre recherche (situation de la ville, climat, .....).

Les espaces extérieurs dans les zones urbaines varient en fonction de leur emplacement, les caractéristiques de conception, type d'équipement et la façon dont ils sont utilisés. Les personnes vivant dans les villes peuvent effectuer différentes activités ou la détente dans différents endroits, comme les places, les parcs, les rues piétonnes. Parmi tous ces facteurs (la qualité esthétique et fonctionnelle) qui pourraient avoir une incidence sur la préférence et la fréquence d'utilisation de ces espaces, les conditions thermiques extérieures jouent un rôle clé.

Après la présentation de la ville, notre cas d'étude s'appuie sur la place Thagaste, afin d'enterrer des scénarios représentatifs sur lesquels nous allons effectuer des simulations numériques.

### III-1- Situation géographique :

Le territoire de la commune de Souk Ahras est situé au Centre-Est de la wilaya de Souk Ahras, elle occupe une superficie totale de 812 km<sup>2</sup>. Il se trouve sur la latitude et la longitude 7.95 Est 36.28 Nord. La ville est située en altitude (653m).

Elle est limitée :

- Au Nord, par les Wilayas de Taref et Guelma.
- A l'Ouest par la Wilaya d'Oum El Bouaghi.
- Au Sud, par la Wilaya de Tebessa.
- A l'Est par la Tunisie.



**Figure III.1** : Situation géographique de la wilaya de souk ahras (source : [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org) 2019)

### III-2- Les différents paramètres climatiques :

Le climat de Souk Ahras est influencé par des facteurs qui lui donnent des caractéristiques spécifiques. Distante de 80 km de la mer Méditerranée, la pénétration des courants marin et humide est aisée. La ville de Souk Ahras est située dans une cuvette, entourée d'un relief montagneux. De ce fait, la ville est caractérisée par un climat semi-humide. Souk-Ahras se distingue par un été chaud et un hiver froid et humide et la pluviométrie atteint une moyenne de 800 mm par an.

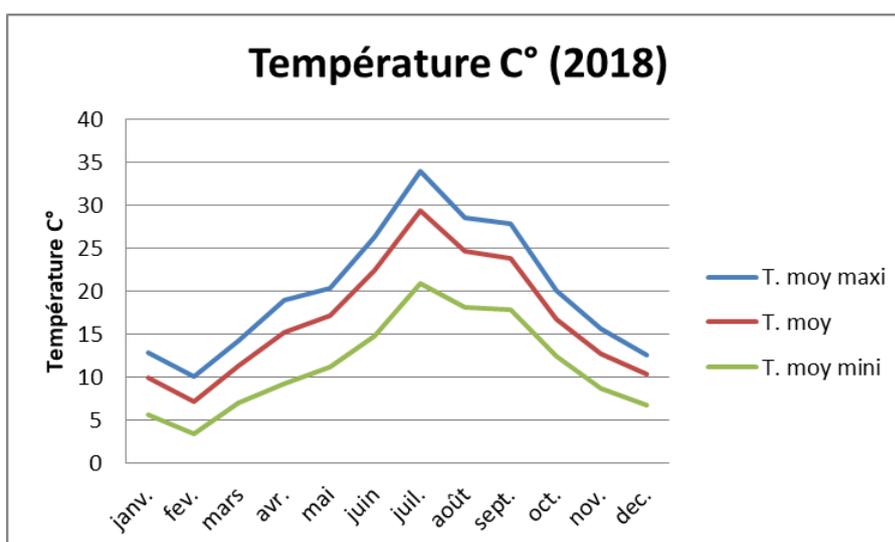
#### III-2-1-La température :

La température moyenne annuelle est de 16,72°C, avec un maximum de 34,00°C en juillet et un minimum de 3,40°C en février. Au mois de juillet, la température moyenne est de 29.4°C. Juillet est de ce fait le mois le plus chaud de l'année.

	janv.	fev.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	dec.
T. moy <b>maxi</b>	12,8	10,1	14,3	19,0	20,3	26,3	34,0	28,5	27,9	20,1	15,6	12,6
T. <b>moy</b>	9,9	7,1	11,3	15,2	17,1	22,5	29,4	24,6	23,8	16,8	12,7	10,3
T. moy <b>mini</b>	5,6	3,4	7,0	9,3	11,2	14,8	20,9	18,2	17,9	12,5	8,7	6,8

**Tableau III.1** : Moyennes mensuelles de la température de l'air pendant (2018)

(Source : [fr.tutiempo.net](http://fr.tutiempo.net), 2019)



**Graphique III.1** : Moyennes mensuelles de la température de l'air pendant (2018)

(Source : Auteur 2019)

**III-2-2-L'humidité relative :**

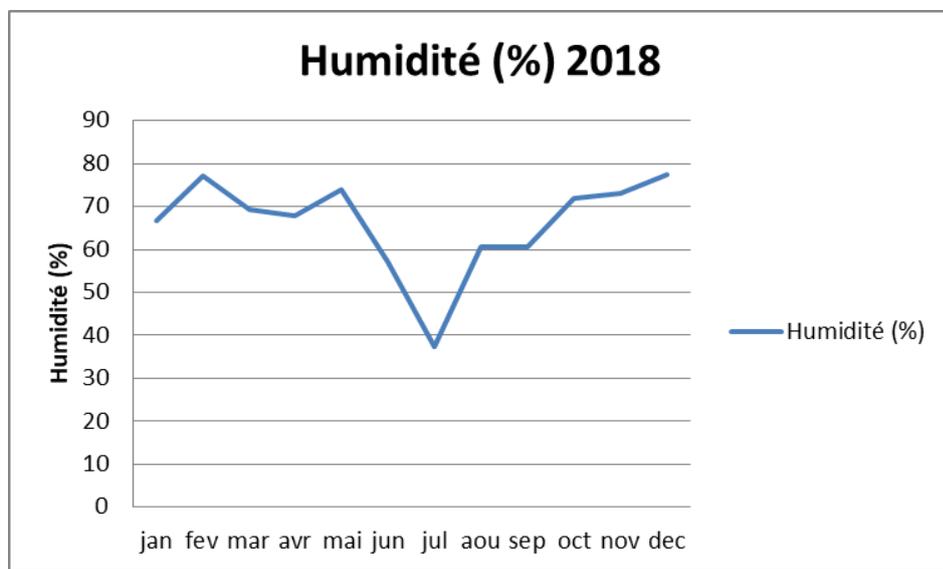
La moyenne annuelle de l'humidité relative est de 66.09 %

Le taux de l'humidité le plus élevé correspond aux mois les plus froids .le taux le plus élevé est enregistré durant le mois de février avec une moyenne de 77,10% et avec une moyenne de 37,40 % pour le mois de juillet.

Les mois	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	aou	sep	oct	nov	dec
Humidité (%)	66,7	77,1	69,4	67,9	73,9	57,0	37,4	60,6	60,6	71,8	73,2	77,5

**Tableau III.2 :** Moyennes mensuelles de l'humidité de l'air pendant (2018)

(Source : fr.tutiempo.net, 2019)



**Graphe III.2 :** Moyennes mensuelles de l'humidité de l'air pendant (2018)

(Source : Auteur 2019)

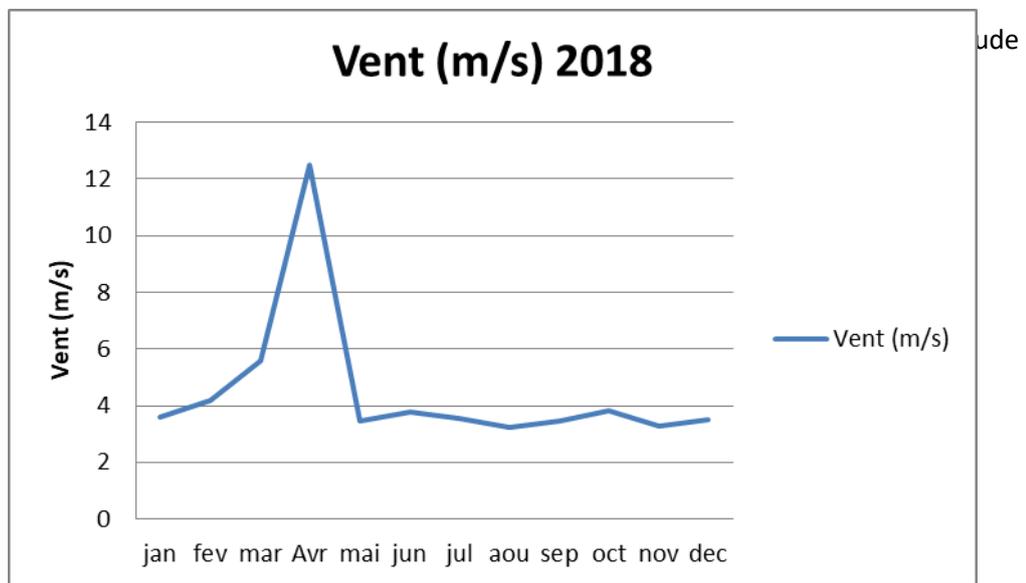
**III-2-3-La vitesse des vents :**

Une valeur maximale de 5,61 m/s enregistrée aux mois de mars. La vitesse du vent au mois de juillet atteignant 3,55 m/s.

Les mois	jan	fev	mar	Avr	mai	jun	jul	aou	sep	oct	nov	dec
V (m/s)	3,61	4,19	5,61	12,5	3,47	3,77	3,55	3,22	3,47	3,83	3,30	3,52

**Tableau III.3 :** Moyennes mensuelles des vitesses du vent pendant (2018)

(Source : fr.tutiempo.net, 2019)



**Grphe III.3 :** Moyennes mensuelles des vitesses du vent pendant (2018)  
(Source : Auteur 2019)

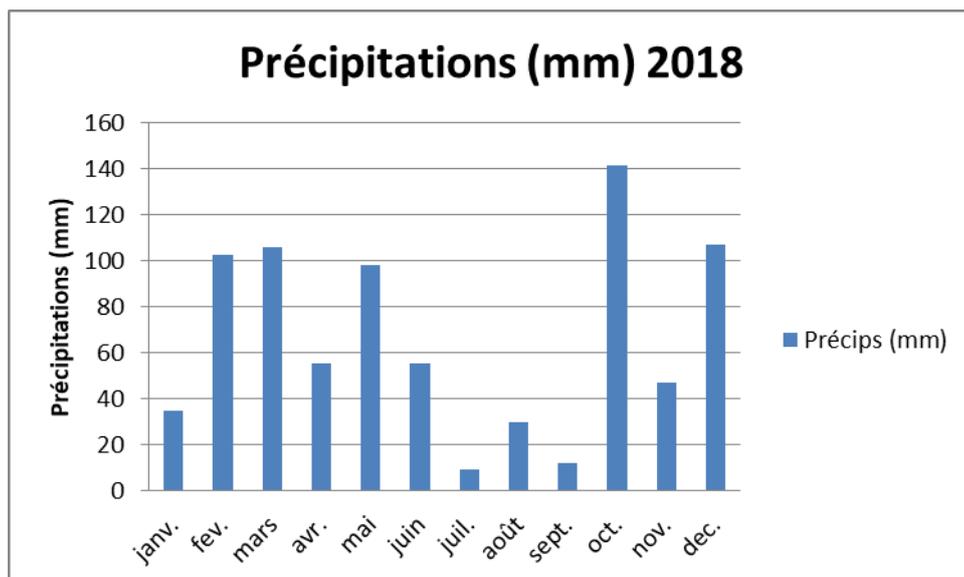
### III-2-4- Les précipitation :

Batna est située dans une région qui reçoit entre 300 et 400 mm de pluie par an. Avril et Mai sont les mois les plus arrosés qui reçoivent respectivement 39.0 et 47.7 mm de moyenne de pluie. Le mois de Juillet est le plus sec avec une moyenne de 6.9mm

Les mois	janv.	fev.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	dec.
Précips (mm)	34,55	102,37	105,65	55,38	98,28	55,12	9,14	29,97	11,93	141,21	46,98	106,92

**Tableau III.4 :** Moyennes mensuelles des précipitations pendant (2018)

(Source : fr.tutiempo.net, 2019)



**Grphe III.4 :** Moyennes mensuelles des précipitations pendant (2018)

(Source : Auteur 2019).

### III-3-Site d'étude, place Thagaste / Souk Ahras / Algérie :

La place Thagaste, se situe au plein centre-ville de souk ahras. D'une forme rectangulaire, sa surface totale est de 2808.00 m<sup>2</sup>. Cette place est composée d'un kiosque à musique en leur centre et deux jets d'eau et le reste carrelée. La place est limitée dans tous les sens par des voies de circulation mécanique. La place Thagaste est l'une des places célèbres et vital à souk ahras.



**Figure III.2 :** 3D de l'image satellite pour le district de la place Thagaste. (source : Google earth 2019).



**Figure III.3 :** la place Thagaste de souk ahras (source : auteur 2019)

#### **III-4- Choix de l'échantillon :**

Le choix des configurations est motivé par :

La situation de la place au cœur de la ville.

Le flux important des piétons qui traverse la place.

#### **III-Conclusion :**

On conclut que le climat de la ville de souk ahras est celui d'une région semi-humide, caractérisé par un hiver froid et humide, et un été chaud.

# **CHAPITRE IV :(Partie pratique)**

## **Simulation numérique**

## **IV- Introduction :**

La simulation numérique est la deuxième approche de l'interaction entre les éléments de la forme urbaine et l'atmosphère urbaine après les mesures in situ. Elle permet de reproduire des phénomènes réels, elle désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique. C'est une série de calculs effectués sur ordinateur, qui aboutit à la description du résultat d'un phénomène. Cette représentation peut être une série de données, une image voire même une animation vidéo. (Colombert, 2008).

D'après Tumini et al (2016), l'approche numérique est une méthode de recherche alternative utilisée dans beaucoup d'études pour deux raisons principales :

- 1- Le modèle numérique est particulièrement adapté pour mettre en évidence le lien entre la structure physique urbaine, le microclimat et le confort thermique en faisant la traduction des résultats pour les lignes directrices de conception pratique.
- 2- Par rapport aux mesures de terrain, il est plus rapide et moins cher, et il permet également des comparaisons entre les nombreuses études de cas et des scénarios de projet.
- 3- La présente recherche s'est basée sur le programme de simulation ENVI-met4, un logiciel déjà testé et exploité dans plusieurs travaux de recherche pour évaluer le confort thermique extérieur.

### **IV-1- Les modèles de simulation numériques :**

D'après Benzerzour (2004). Les modèles de simulation numériques en climatologie urbaine qui s'appliquent à l'échelle de la Canopée urbaine prennent en compte la surface urbaine selon deux méthodes :

#### **IV-1-1- Méthode par discrétisation spatiale :**

C'est une méthode qui s'applique généralement à des échelles spatiales limitées qui sont plus proches de l'échelle microclimatique que de l'échelle climatique locale. Il s'agit dans ces modèles de prendre en compte l'aspect tridimensionnel des espaces urbains en prenant en compte le tracé et les hauteurs réelles des espaces et des bâtiments. Ensuite un maillage assez fin est appliqué aux surfaces et aux éléments de la canopée urbaine pour permettre d'analyser les mécanismes de propagation des phénomènes physiques d'une maille à une autre. La finalité de ces modélisations est de quantifier les propriétés physiques des surfaces et de l'air correspondant à l'échelle de la canopée qui peut aller d'un espace urbain à un ensemble bâti (quelques centaines de mètres). (Benzerzour, 2004).

#### **IV-1-2-Méthode Par paramétrisation :**

La discrétisation spatiale exige des temps de calculs trop importants qui ne permettent pas de l'appliquer à l'échelle climatique locale et encore moins à l'échelle Mésoscale. Pour pallier cela, les modèles physiques qui s'appliquent à ces échelles ont été contraints de réduire la complexité morphologique de la surface urbaine à un certain nombre de paramètres représentatifs de l'influence de cette dernière sur les échanges sol-atmosphère. Le plus connu de ces paramètres est le concept de canyon. (Benzerzour, 2004).

#### **IV-2- Description du logiciel ENVI-met :**

Le logiciel ENVI-met3 est un programme tridimensionnel de simulation élaboré par Michael Bruse de l'institut de géographie à l'université de Bochumen Allemagne.

Ce logiciel permet de calculer l'ensemble des variables climatiques qui permettent d'évaluer le bilan énergétique des espaces extérieurs : température et vitesse de l'air, rayons solaires de courtes et grandes longueurs d'ondes, températures des surfaces, indices de confort...etc.

Il permet ainsi d'analyser l'impact des modifications de l'environnement urbain sur le microclimat à petite échelle (arbres, cours intérieures végétalisées, altérations des hauteurs des bâtiments, etc.) Le modèle est utile pour faire un pronostic des scénarios urbains appliqué à l'architecture, aménagement urbain et environnemental et climatologie. (Knodel, 2012) ENVI-met est un modèle 3D non hydrostatique qui s'appuie sur une grille géométrique.

La résolution horizontale est entre 0,5m et 5m pour une maille. Au total, la grille entière (le maillage) peut avoir une dimension de 250x250x25 mailles pour les ordinateurs récents. Cela permet de couvrir une zone de 100mx100m jusqu'à 1kmx1km. ENVI-met n'est donc pas conçu pour modéliser le climat d'une ville entière mais seulement d'un quartier.

L'exploitation du programme ENVI-met est jumelée par celle d'un autre programme appelé « Leonardo » qui permet de lire les résultats de la simulation en 2D et 3D déjà effectuée par ENVI-met. (Colombert, 2008).

Le logiciel Envi-met 3 a été utilisé pour évaluer le confort thermique extérieur sur la base de l'indice de confort thermique PMV (Vote Moyen Prévisible). Cet indice initialement développé pour les milieux Intérieurs fut adapté aux espaces extérieurs par Jendritzky en 1993.

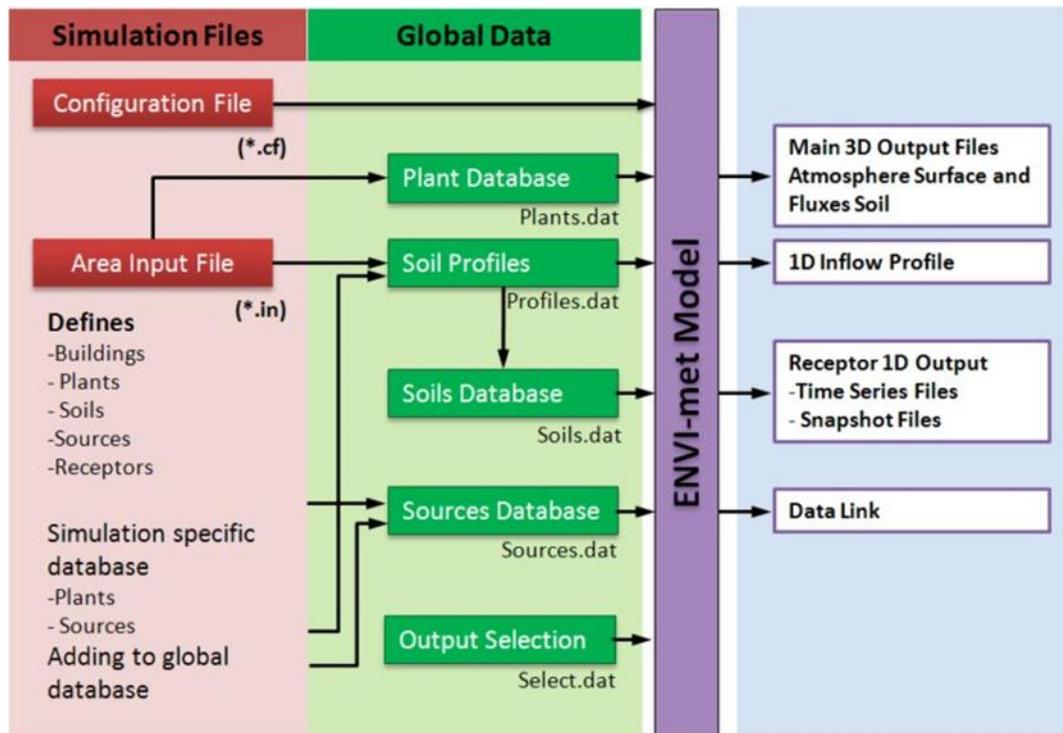


Figure IV.1 : Diagramme de flux des données (Source : Knodel, 2012)

### IV-3- déroulement de la simulation :

#### IV-3-1-Les données d'entrée pour le modèle

Les données météorologiques utilisées pour initier les modèles de simulation ont été fournies par la station météorologique: 604230.

Les microclimats les caractéristiques sont représentant la température de l'air et de l'humidité relative des conditions les plus chaudes de jour d'été dans la ville de Souk ahras ont été utilisés. Par conséquent, les données météorologiques horaires le 21 Juillet 2018, ont été considérées comme le jour le plus chaud des conditions climatiques régionales qui affectent sur la zone urbaine de Souk ahras dans les milieux de la météorologie d'été. Pour les conditions initiales était de 5.21 m / s la vitesse du vent et 270 degrés. la direction du vent. Simple forçage température de l'air et l'humidité relative sont utilisés le long d'une période de jour, ce qui explique que la température de l'air minimum était de 26.1 °C à 6 heures et la température maximale de l'air était de 39.7 °C à 16 heures. L'humidité relative minimale à 16 heures était de 59%, le taux d'humidité relative maximale à 7 heures était de 22%. Le temps de simulation totale est de 12 heures. La zone modélisée a les dimensions suivantes: (125 84).

La zone modèle a été obtenu avec la taille de la grille  $x = 50$ ,  $y = 42$  et  $z = 15$ , cette grille la taille est représentée dans une cellule de la grille, la taille de la cellule de grille est la

suivante:  $dx = 2.5m$ ,  $2 m$  et  $dy = dz = 2m$ . Le modèle a été tourné de 45 selon la direction principale du Nord.

Le tableau ci-dessous, présente les paramètres introduits dans le fichier de configuration INPUT \*.cf.

<b>Situation</b>	Latitude : 36.28 N Longitude : 07.95 E Climat : semi humide Altitude : 680
<b>Période de simulation</b>	Eté
<b>Journée de simulation</b>	21-07-2018
<b>Durée de simulation</b>	08h00 à 16h00
<b>Vitesse de l'air m/s</b>	5.21
<b>Humidité relative [%]</b>	36
<b>La température de l'air [C°]</b>	39.7°

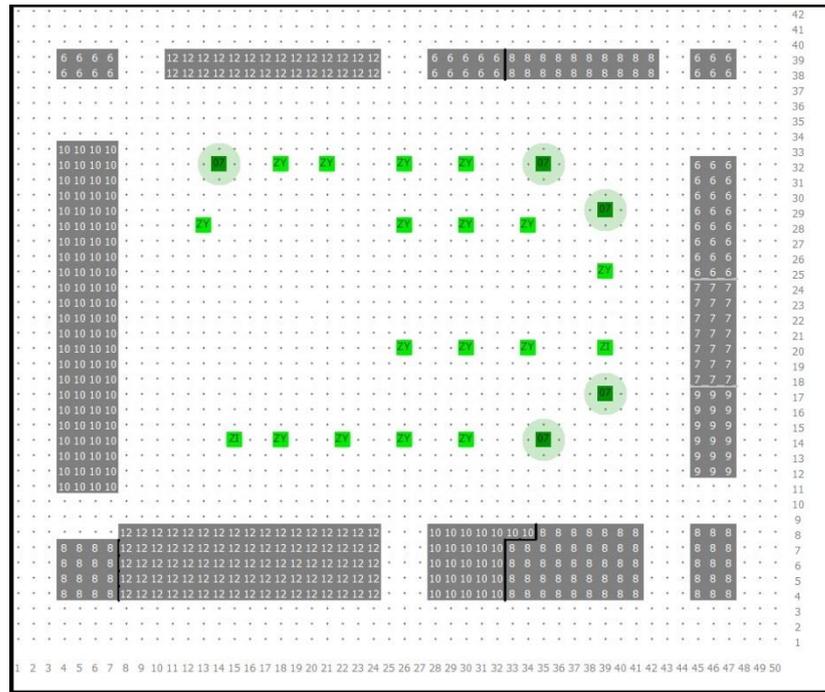
**Tableau IV.1** : les principaux paramètres introduits au fichier \*.cf.

#### **IV-3-2- Scénarios :**

Les travaux de simulation d'enquête comparative, a pour objectif de mettre en évidence le rôle de l'ombrage sur le confort thermique extérieur de la place publique (Thagaste).

Deux scénarios différents pour la place Thagaste :

- **Le premier scénario** c'est l'été riel de la place Thagaste , il y a peu d'ombre dans ce modèle (figure IV 2).



**Figure IV.2 :** 2D pour Le premier scénario de la place simulée par ENVI. Met (source : [auteur 2019](#))

- **Le second scénario**, après l’insertion des arbres pour ombrager la place. La proposition basée sur l’idée d’embellir la place par des alignements d’arbres (figure IV 3).

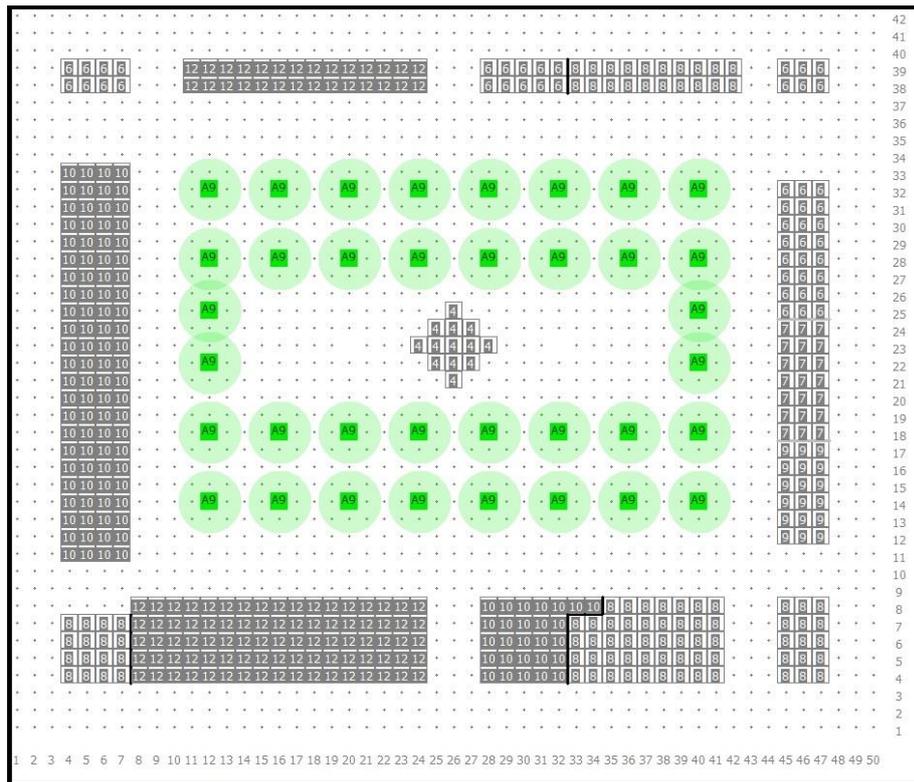
La figure IV 4 présente la proposition optimale d’une conception de la végétation laquelle a donné des résultats concluants, par rapport aux autres cas de conception de végétation de la place, avec variantes.

La végétation conçue est basée sur deux paramètres essentiels :

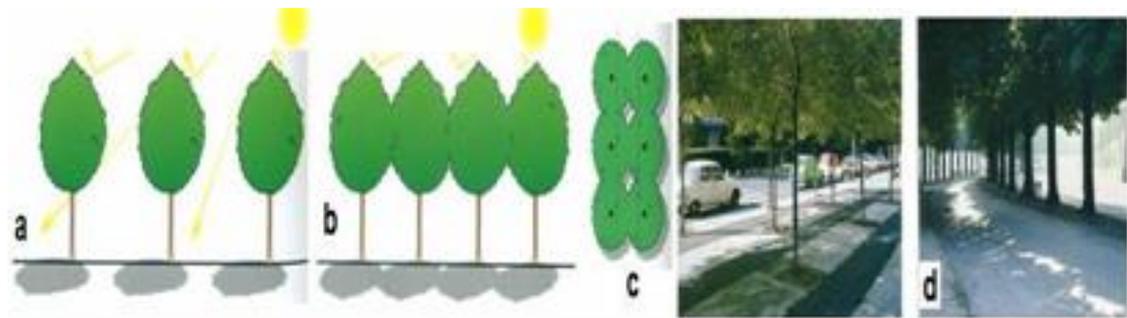
- Le premier, est de ne pas végétaliser toute la surface de la place. L’objectif est de laissé un endroit non couvert pour des usagers qui adorent le soleil. Par ailleurs, il est recommandé d’assurer une végétation avec un rapport 60/40 végétation /espace bâti. Dans notre conception, on est arrivé à 65% d’espace végétalisé de la surface totale de la place (figure IV 3).

- le second paramétré est de répondre au critère du confort thermique par la création d’un masque ou bien une couverture naturelle contre les rayons solaires. (Figure IV 4(d))

« Le campestre »offre une ombre plus dense, en plus le type de conception de la végétation est par alignement.



**Figure IV.3 :** 2D pour Le second scénario de la place simulée par ENVI. Met (source : [auteur](#) 2019)



**Figure. IV 4 :** (a) L'implantation des arbres permet le passage des rayons solaires ; (b) et (c) un vrai masque aux rayons solaires et ce qui a été adopté dans notre conception; (d) présente la qualité de l'ombre.

#### IV-4-Evaluation du confort thermique :

Pour les deux cas étudiés, nous avons cherché à déterminer les niveaux de confort à l'aide d'indices présentés dans le chapitre sur le confort thermique en extérieur.

L'indice de PMV a déjà été utilisé par des études à l'échelle extérieure, il sera choisi dans le cas de notre étude, afin de comparer ses résultats avec les résultats du l'indice UTCI.

D'après Tumini et al (2016), l'UTCI est la référence plus appropriée pour l'évaluation du confort parce que :

1-Il peut décrire les conditions de bien-être de l'individu,

2-Il est facile de calculer à l'aide des paramètres climatiques qui peuvent être obtenus par la simulation,

3-Il fournit un large éventail de résultats afin d'établir une distinction entre les diverses solutions possibles.

**IV-4-1- Vote moyen prévisible (PMV):**

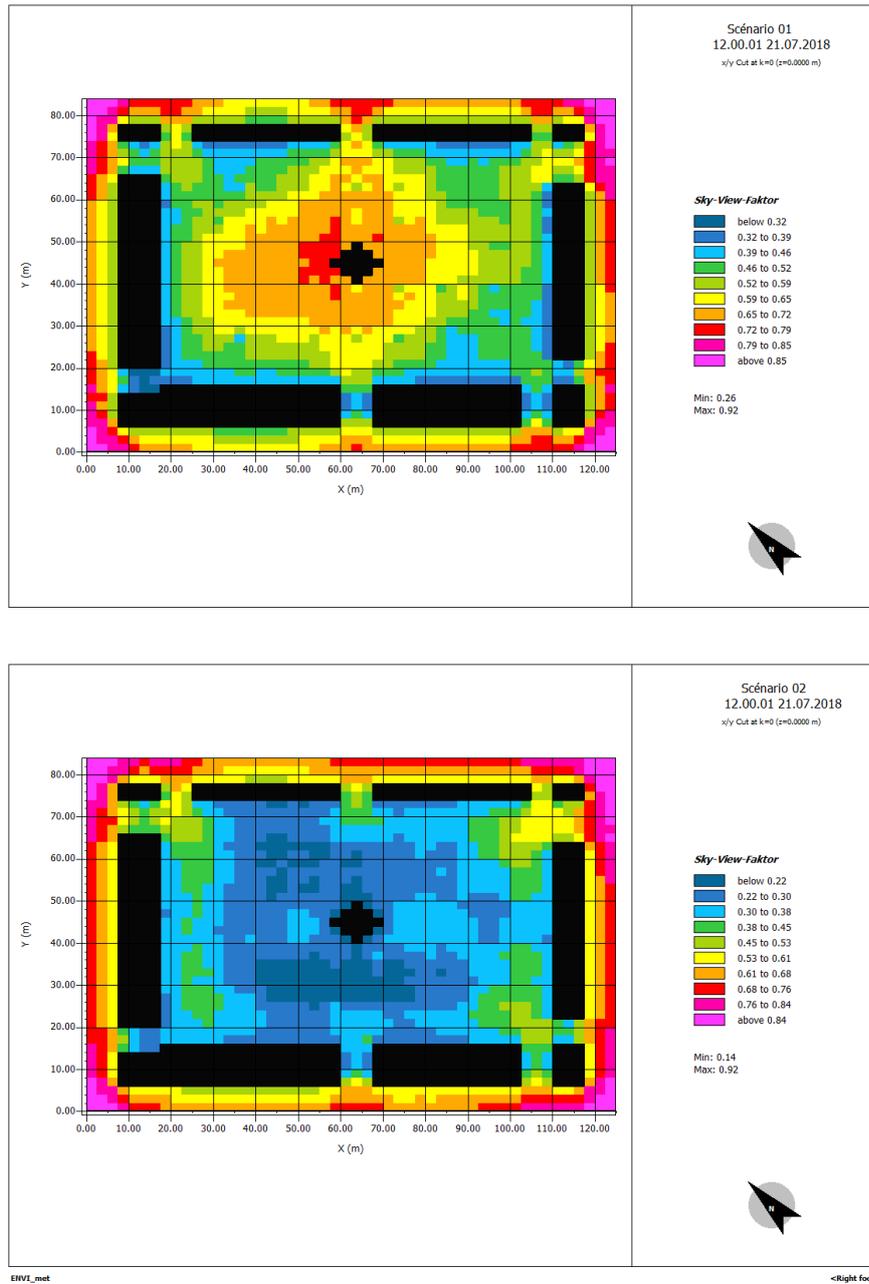
PMV évalue la perception thermique moyenne d'un groupe de personnes dans l'environnement. Le vote moyen prévisible (PMV) considère l'indice pour évaluer le confort thermique extérieur qui est basé sur les paramètres du bilan thermique et la température perçue (tableau IV 2).

<b>PMV</b>	<b>Description</b>
<b>Moins de -4</b>	Extrêmement Froid
<b>Entre -3 et -4</b>	Moyennement Froid
<b>Entre -2 et -3</b>	Frais
<b>Entre -1 et -2</b>	Légèrement frais
<b>Entre -1 et +1</b>	Neutre
<b>Entre +1 et +2</b>	Légèrement tiède
<b>Entre +2 et +3</b>	Tiède
<b>Entre +3 et +4</b>	Moyennement chaud
<b>Plus de +4</b>	Extrêmement chaud

**Tableau IV.2 :** Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort. (Source : Bruse, 2015)

**IV-4-2-Facteur d'ouverture au ciel (SVF) :**

Le facteur SVF (Sky view factor), permet aux chercheurs d'évaluer les échanges de chaleur par rayonnement entre l'espace étudié et le ciel. Ce dernier peut être obtenu par calcul (formule) ou par simulation. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Si la valeur du SVF = 1, donc l'espace étudié est isolé; et si la valeur du SVF < 1, veut dire que l'espace est obstrué. Ce facteur est considéré comme un facteur morphologique important et essentiel dans l'impact sur le microclimat.



**Figure IV.5 :** Représentation du facteur d’ouverture au ciel (SVF) pour les deux scénarios.  
(Source : auteur 2019)

#### IV-5-Analyse des résultats de simulation :

Un chemin piétonnier proposé traverse la place, est simulée pour illustrer l’objectif des conditions thermique transitoires des piétons. Le chemin (AB) est d’environ 60m de long.(figure IV 6)

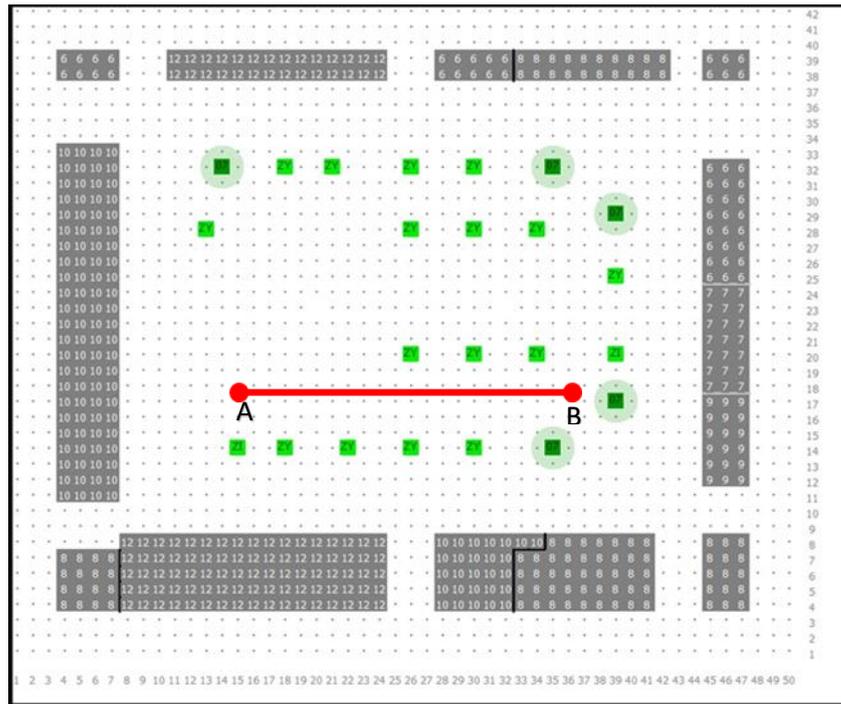
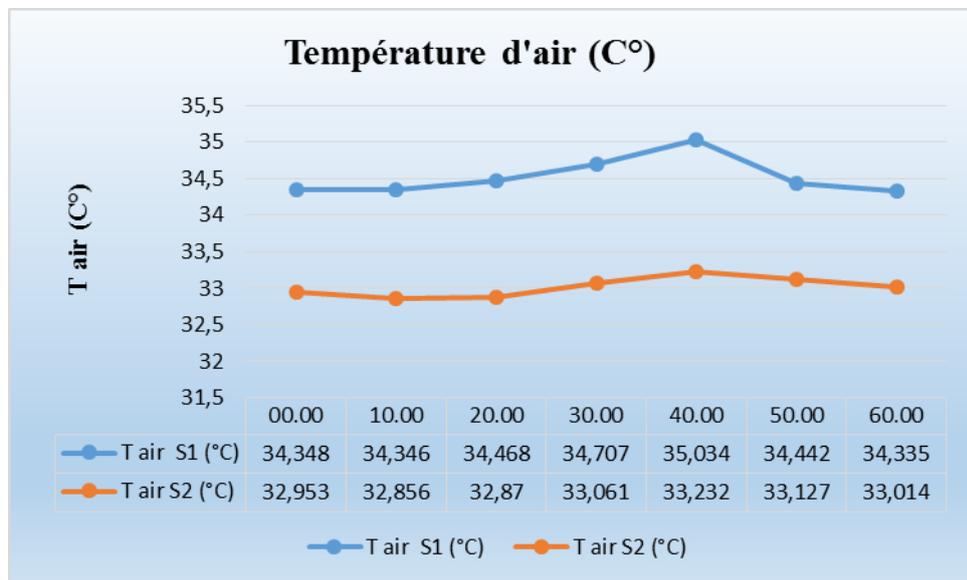


Figure IV.6 : 2D pour Le premier scénario de la place simulée par ENVI. Met (source : [auteur](#) 2019)

VI-5-1- les paramètres microclimatiques simulés :

VI-5-1-1- La température de l'air (T air) :

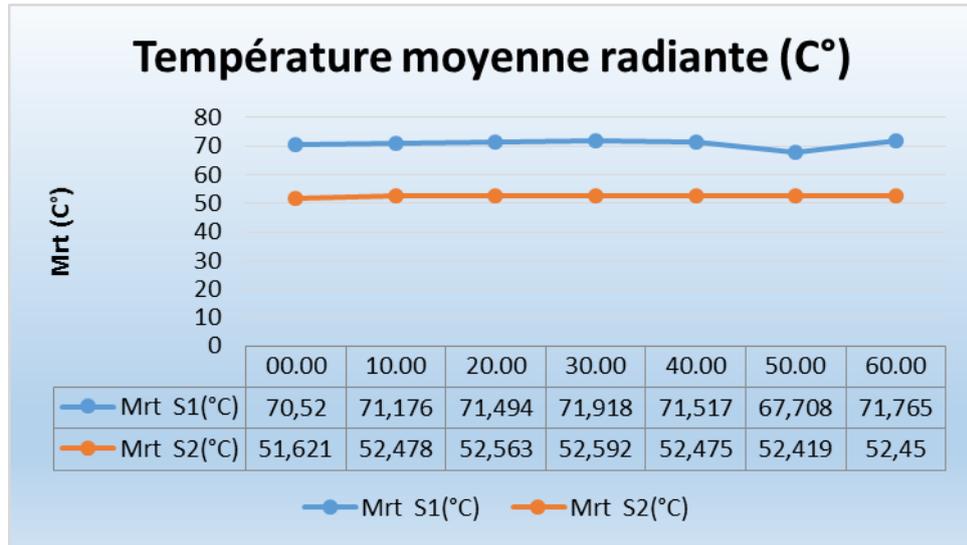


Graphe IV.1 : Distribution de la température de l'air à midi pour le chemin (AB). (Source : Auteur, 2019)

Le scénario 2 contribué à réduire au minimum la température de l'air le long de chemin AB varie de **1.32 à 1.80 C°**. L'ombre réduit l'effet de la température dans la place en raison de la diminution de facteur de vue du ciel, et l'effet du rayonnement solaire.

Par contre le facteur de vue du ciel dans l'état riel conduit à une température de l'air plus élevée dans la place, car l'augmentation du SVF conduit à l'augmentation de la quantité de radiation absorbée par la surface de sol.

**VI-5-1-2- Température moyenne radiante (Mrt) :**

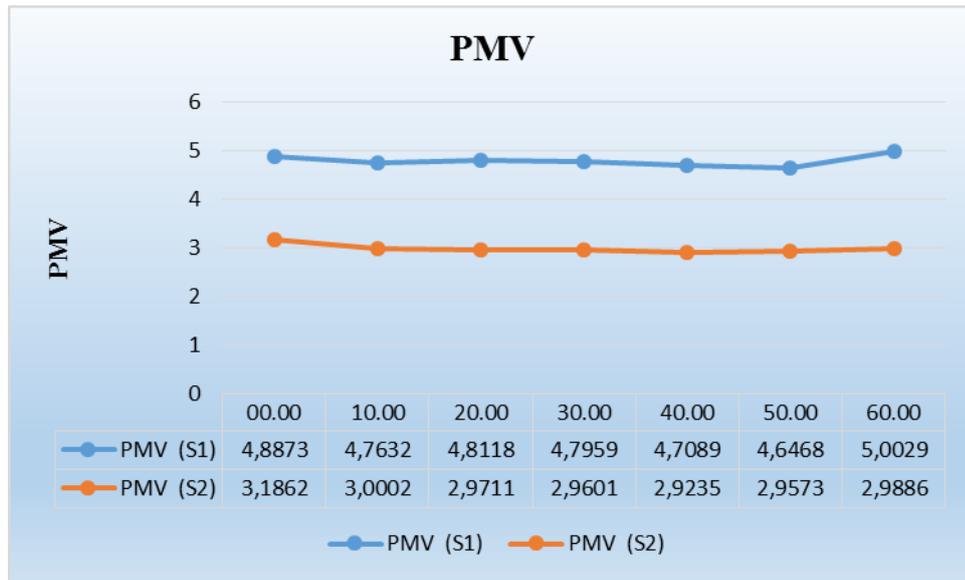


**Graphe IV.2** : la température moyenne radiante a midi pour le chemin (AB).(Source : Auteur, 2019)

D'après, les résultats de simulation, on remarque que les valeurs minimales de la température moyenne radiante sont les résultats de scénario 2.

La diminution maximale de la valeur de température moyenne radiante attient a 51.62 C° sur le trajet (AB) dans la place.

**IV-5-1-3- Vote Moyen Prévisible (PMV) :**



**Graphe IV.3 :** Valeur de PMV à midi pour la trajectoire (AB). (Source : Auteur, 2019)

D’après ; les résultats de simulation, on remarque une diminution de valeurs PMV du scénario 2 par rapport l’état riel a 1.31jusqua 2.01 dans le trajet (AB).

**IV-5-1-4- L’indice thermique universel du climat (UTCI) :**

Pour l’évaluation du degré de confort, nous avons opté pour l’indice UTCI. Nous avons calculé les valeurs de l’UTCI pour le chemin AB à midi pendant la journée typique choisie à partir des données au cours de la simulation numérique. Les facteurs climatique ; la température d’air, la température moyenne radiante, la vitesse de l’air, et l’humidité relative sont indispensables pour le calcul de l’UTCI. En utilisant l’Excel de Microsoft comme outil de calcul selon l’équation suivante ;

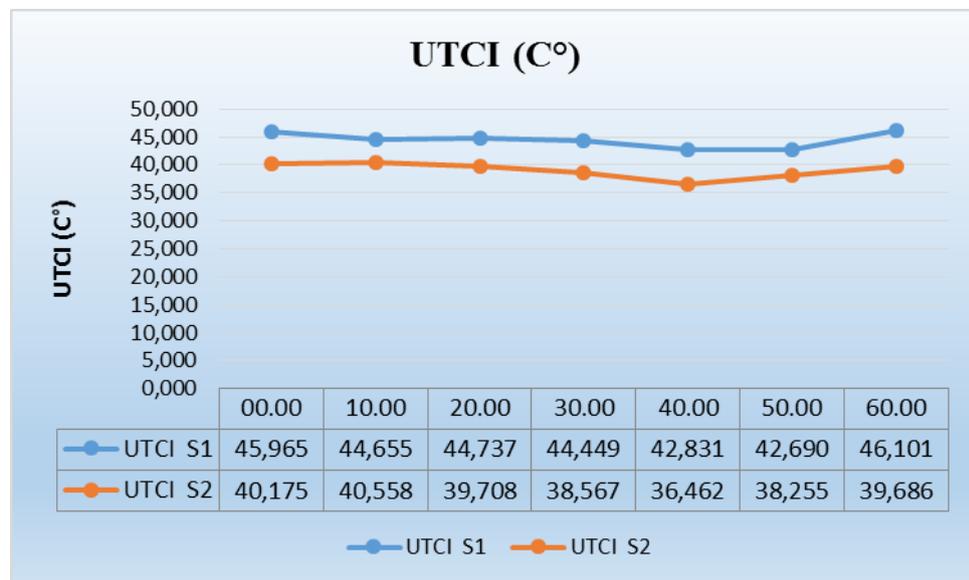
$$UTCI = 3.21 + 0.872 T + 0.245 Mrt - 2.507 V - 0.0176 HR$$

➤ **Chemin (AB) S1 :**

AB m	0	10	20	30	40	50	60
Tair (°C)	34,348	34,346	34,468	34,707	35,034	34,442	34,335
Mrt (°C)	70,52	71,176	71,494	71,918	71,517	57,708	71,765
V (m/s)	1,5304	2,1175	2,1604	2,4053	3,1305	1,6183	1,5916
HR (%)	36,836	36,861	36,618	35,921	35,472	36,726	37,062
UTCI 1	45,965	44,655	44,737	44,449	42,831	42,690	46,101

➤ **Chemin (AB) S2 :**

AB m	0	10	20	30	40	50	60
Tair (°C)	32,953	32,856	32,87	33,061	33,232	33,127	33,014
Mrt (°C)	51,621	52,478	52,563	52,592	52,475	52,419	52,45
V (m/s)	1,51361	1,4077	1,7608	2,2906	3,1858	2,4237	1,8113
HR (%)	35,955	36,373	36,408	35,816	35,147	35,533	36,046
UTCI 2	40,175	40,558	39,708	38,567	36,462	38,255	39,686



**Graphe IV.4 :** Valeur d'UTCI à midi pour la trajectoire (AB). (Source: Auteur, 2019)

D'après ; les résultats de simulation, on remarque l'absence totale de la zone de stress thermique dans le trajet (AB), tous les points de trajet enregistrent un stress thermique.

La diminution maximale de la valeur de l'UTCI du scénario 2 atteint 36.46 C°.

#### **IV-Conclusion :**

Dans cette partie du mémoire une simulation a été effectuée dans le but d'analyser le microclimat urbain et le confort thermique en espace extérieur.

Ce chapitre est entamé par la présentation du logiciel ENVI-met4, en présentant les différentes étapes à suivre, englobe trois étapes principales : définition de la maille du modèle, présentation des paramètres d'entrée (*input*) et le choix des données de sorti (*output*). Les fichiers du ENVI-met ont format de visualisation 2D et 3D à travers du modèle LEONARDO. Il permet aussi des formats EDT et EDI qui permettent d'exporter à d'autres logiciels comme Excel.

L'étude est menée pour rendre compte du rôle de l'ombrage dans l'amélioration du confort thermique des espaces extérieur en été. Travaux de simulation sont effectués le jour le plus chaud en été, donc les résultats ont révélé une diminution de température d'environ 1.32 C° ET 1.80 C°, on peut conclure que l'ombre est une bonne solution pour atténuer les températures élevées pour la place.

Les résultats obtenus pour la température moyenne radiante de scénario 1 en raison du manque d'ombrages qui a amélioré pour diminuer les valeurs des températures moyenne radiante dans scénario 2 a 51.62 C°.

Selon les résultats des indices PMV et UTCI, nous avons observé que l'ombrage des arbres dans le scénario2 pourrait influencer sur le confort thermique de la place.

L'ombre affecte et apport des améliorations significatives sur le confort thermique aux espaces extérieurs, veut dire, l'ombre atténuent le rayonnement solaire, ensuite la température moyenne radiante. En effet, l'ombre augmente le confort thermique dans les espaces extérieurs à climat semi humide.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale :

Cette recherche nous a permis de mettre en exergue l'effet de l'ombrage sur le confort thermique extérieur dans la ville de souk ahras caractérisée par un climat semi-humide. Elle a traité l'impact de l'ombre sur le confort thermique des usagers dans les espaces extérieurs. Les résultats de notre étude indiquent que dans un environnement semi-humide, le confort thermique d'un piéton peut être modifié de manière considérable par la présence de l'ombre, le facteur de vue du ciel SVF et l'orientation.

Ce présent travail a été divisé en deux parties. Premièrement, une familiarisation avec les différents concepts liés au thème de recherche. Cette première phase a été développée en deux chapitres ;

- **Le premier chapitre** a traité la problématique de l'impact de l'ombre sur le confort thermique extérieur. Cette lecture historique nous a permis de définir la relation entre le climat et l'espace urbain, que ce soit tout d'abord dans la prise en compte des conditions climatiques d'un site ou, plus tard, dans l'influence de la ville sur son environnement.

- **Le deuxième chapitre** a consisté en une approche théorique sur la notion du confort thermique dans les espaces extérieurs. Plusieurs définitions de la notion du confort thermique sont proposées. Ainsi que les différents paramètres relatifs à l'environnement et à l'individu qui font intervenir différents échanges thermiques. Enfin, une présentation de différents indices de confort thermique extérieur.

- **Le troisième chapitre** il a rassemblé une série d'études analytiques et expérimentales récentes menées par des chercheurs, comprenant l'interaction entre les paramètres climatiques et la configuration et l'aménagement urbain de l'espace en termes des conditions microclimatique et du confort thermique.

Après avoir acquis toutes les notions élémentaires au cours de la partie théorique, la deuxième partie s'est articulée autour d'aspects pratiques. Elle a consisté en une présentation de la ville de Souk Ahras (situation, évolution historique de la ville, climat, .....).

La simulation numérique constitue la deuxième partie de la recherche. Elle s'est basée sur un programme tridimensionnel appelé « ENVI-met », celui qui définit les valeurs quantitatives de l'aspect microclimatique, en se basant sur deux variables principales : la

température de l'air et la température moyenne radiante ainsi que sur les indices de confort thermique : le PMV et l'UTCI.

Sur la base des résultats obtenus, et en fonction de résultats de la simulation, on peut conclure que l'ombre a un impact très important sur l'environnement thermique extérieur.

En conclusion, on peut dire que les objectifs précédemment tracés ont été atteints et hypothèse mise en place a été vérifiée.

**BIBLIOGRAPHIE :**

Marialena Nikolopoulou, Spyros Lykoudis (2007) Utilisation des espaces extérieurs et microclimat dans une zone urbaine méditerranéenne [J] .building et l'environnement, 2007 (42) : 3691-3707

M. Nikolopoulou, S. Lykoudis (2006) confort thermique dans les espaces urbains en plein air : analyse dans les différents pays européens, construire. Environ. 41 (2006) 1455-1470.

A. Middel, N. Selover, B. Hagen, N. Chhetri (2016) Impact de l'ombre sur thermique extérieure confort d'une étude sur le terrain de saison à Tempe, Arizona, Int. J. Biometeorol. 60 (2016) 1849-1861.

S. Anupriya(2016) étude exploratoire sur la relation entre les paysages urbains et urbains couloirs pour le confort thermique extérieur, Procedia Technol 24 (2016) 1801-1807.

L. Chen, E. Ng(2012) le confort thermique extérieur et activités de plein air : un examen de recherche dans la dernière décennie, les villes 29 (2012) 118-125.

F. Salata, I. Golasi, E. de L. Vollaro, F. Bisegna, F. Nardecchia, M. Coppi, F. Gugliermetti, A. de L. Vollaro (2015) évaluation des différentes stratégies de mitigation du microclimat urbain à travers une analyse PMV, Sustain. Fois 7 (2015) 9012-9030.

L. Martinelli, TP Lin, A. Matzarakis (2015) l'évaluation de l'influence des ombrages quotidiens motif sur le confort thermique humain et la présence à Rome pendant la période d'été, Bât. Environ. 92 (2015) 30-38.

D. Lai, D. Guo, Y. Hou, C. Lin, Q. Chen (2014) études de confort thermique extérieur en Nord de la Chine, construire, Environnement. Fois 77 (2014) 110-118.

MA Ruiz, FR Correa(2015) modèle adaptatif pour l'évaluation de confort thermique extérieur en une ville oasis du climat aride, Bât. Environ. 85 (2015) 40-51.

M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers (2001) confort thermique dans les espaces urbains en plein air : comprendre le paramètre humain, Sol. Energie 70 (2001) 227-235.

I. Tumini, E. Higuera Garcia, S. Baereswyl Rada (2016) microclimat urbain et thermique modélisation de confort : stratégies de rénovation urbaine, Int. J. sustain. Construire. Technol. Dev Urban. 7(2016) 22-37.

- S. Oliveira, H. Andrade (2007) une évaluation initiale du confort bioclimatique dans un espace public extérieur à Lisbonne, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2007) 69-84.
- Chuang-Hung Lin, Tzu-Ping Lin, Ruey-Lung Hwang (2013) Confort thermique pour parcs urbains subtropicale: Perception de la compréhension des visiteurs, Comportement et l'assiduité [J]. *Les progrès de la météorologie*, 2013: 1-8.
- L Martinelli, TP Lin, A Matzarakis (2015) Évaluation de l'influence du modèle de ombrages quotidien sur le confort thermique humain et la présence à Rome pendant la période d'été [J]. *Bâtiment et environnement*, 2015, 92 (6): 30-38.
- Johansson et Emmanuel (2006) The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *Int J Biometeorol* 51(2):119–133.
- Lin T-P, Matzarakis A, Hwang R-L (2010) Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Build Environ* 45(1):213–221.
- Vanos JK, Middel A, McKercher GR, Kuras ER, Ruddell BL (2016) A multiscale surface temperature analysis of urban playgrounds in a hot, dry city. *Landscape Urban Plan* 146:29–42.
- Musy Marjorie. (2014). Une ville verte: les rôles du végétal en ville. Livre. Éditions Quae.
- Reiter Sigrid. (2007). Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes. Thèse de doctorat. UCL Université catholique de Louvain.
- Perrineau Hélène. (2013). Développement d'un outil, basé sur le logiciel de simulations thermiques dynamiques TRNSYS, permettant de réaliser des études paramétriques pour évaluer le confort extérieur avec la température perçue.
- Moujalled Bassam. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat. Institut des Sciences Appliquées de Lyon.
- ZEKRI Elyes. (2010). Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ DE NANTES.
- Grignon-Masse Laurent. (2010). Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été

: cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

Vinet Jérôme. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

Musy Marjory. (2008). Approches physiques des ambiances urbaines caractérisation et conception. Centre d'échanges et de ressources pour la qualité environnementale des bâtiments et des aménagements en Rhône-Alpes.

Petit Cécile et al. (2003). Du confort thermique à la caractérisation sensorielle des ambiances. REVUE FRANÇAISE DU MARKETING N° 194 - 4/5.

Tsoka Stella. (2011). Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons Application au cas des éco-quartiers. Thèse de Master Sciences et Techniques des Environnements Urbains.

Monteiro Leonardo Marques. (2005). Review of numerical modelling of outdoor thermal comfort. The 2005 World Sustainable Building Conférence. Tokyo.

Walls Wendy, Parker Nicki and Walliss Jillian. (2015). Designing with thermal comfort indices in outdoor sites. 49th International Conférence of the Architectural Science Association.

Medeou K.F et al. (2015). Ambiances bioclimatiques et performance des agriculteurs dans le département des collines au Bénin (Afrique de l'ouest). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.

Błażejczyk Krzysztof. (2013). an introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). Geographic Polonaise 2013, 86, 1, pp. 5-10. Institute of Geography and Spatial Organization Polish Academy of sciences.

Ariane Middel, Nancy Selover, Bjorn Hagen, et Nalini Chhetri (2016) Impact de l'ombre sur le confort thermique extérieur ; étude de terrain saisonnière a Tempe, en Arizona, biométéorologie, volume 60, N 12, pp 1849-1861.

Suaad. Ridha, Stéphane Ginestet, et Sylvie Lorente (2018) Effet du motif et de verdure stratégies de fondes sur le confort thermique extérieur, Engineering et Technologie, vol 10, N 2

Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat. University Paris-Est., France.

Ben Zerzour Mohamed. (Le 15 octobre 2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique ». Ecole architecture de Nantes: These de DOCTORAT.

Knodel Susan Honjo. (2012). évaluation de l'environnement thermique urbain comme outil d'aménagement du territoire. Etude de cas dans deux quartiers de la ville de São Paulo (Brésil). Mémoire de Master en Sciences de l'Environnement. Institut des Sciences de L'environnement, Université de Genève.

**Sites Internet :**

<http://www.fr.wikipedia.org> 2019

<http://www.fr.tutempo.net>, 2019

<http://www.Google earth> 2019

# **LES ANNEXES**

Annexe 01 : Simulation de premier scénario

heures	PMV	
	Scénario 01	Scénario 02
08H00		
10H00		
12H00		
14H00		

heures	PMV	
	Scénario 01	Scénario 02
16H00		
18H00		

heures	Température de l'air (°C)	
	Scénario 01	Scénario 02
08H00		
10H00		
12H00		
14H00		

heures	Température de l'air (°C)	
	Scénario 01	Scénario 02
16H00		
18H00		

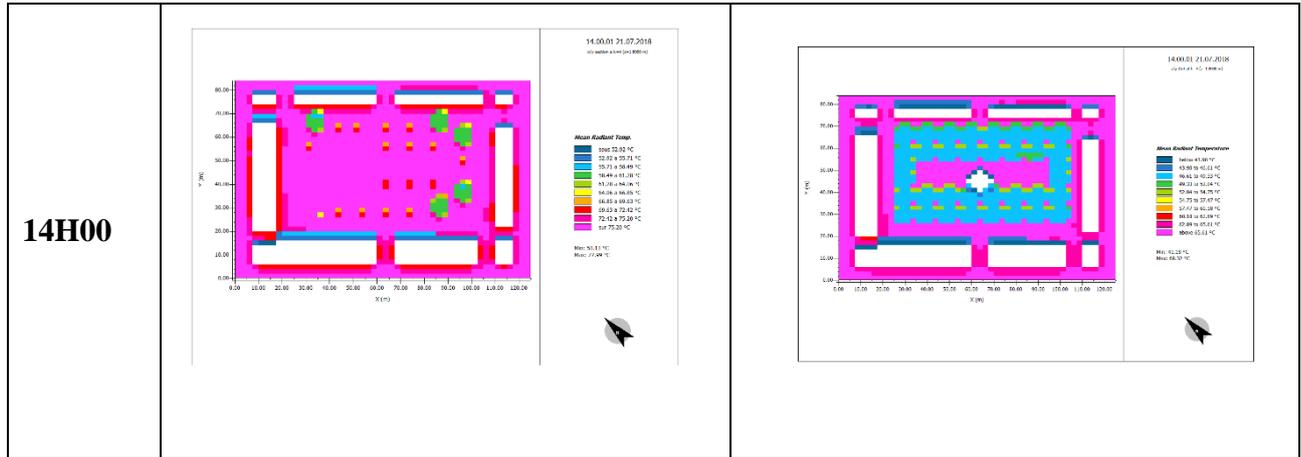
heures	Vitesse de l'air (m/s)	
	Scénario 01	Scénario 02
08H00		
10H00		
12H00		
14H00		

heures	Vitesse de l'air (m/s)	
	Scénario 01	Scénario 02
16H00	<p>16:00:01 21.07.2008 vitesse de l'air (m/s)</p> <p>Min: 0.07 m/s Max: 11.74 m/s</p>	<p>16:00:01 21.07.2008 vitesse de l'air (m/s)</p> <p>Min: 0.07 m/s Max: 10.00 m/s</p>
18H00	<p>18:00:01 21.07.2008 vitesse de l'air (m/s)</p> <p>Min: 0.07 m/s Max: 11.74 m/s</p>	<p>18:00:01 21.07.2008 vitesse de l'air (m/s)</p> <p>Min: 0.07 m/s Max: 10.00 m/s</p>

heures	Humidité relative (%)	
	Scénario 01	Scénario 02
08H00		
10H00		
12H00		
14H00		



heures	Température moyenne radiante (°C)	
	Scénario 01	Scénario 02
08H00	<p>08.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temp.                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>	<p>08.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temperature                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>
10H00	<p>10.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temp.                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>	<p>10.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temperature                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>
12H00	<p>12.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temp.                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>	<p>12.00.01 31.07.2018                      (1) 100 x 100 (1000000)                      Mean Radiant Temperature                      20.00 à 26.00 °C                      21.00 à 21.50 °C                      22.00 à 22.50 °C                      23.00 à 23.50 °C                      24.00 à 24.50 °C                      25.00 à 25.50 °C                      26.00 à 26.00 °C                      Min: 20.00 °C                      Max: 26.00 °C</p>



heures	Température moyenne radiante (°C)	
	Scénario 01	Scénario 02
<b>16H00</b>		
<b>18H00</b>		