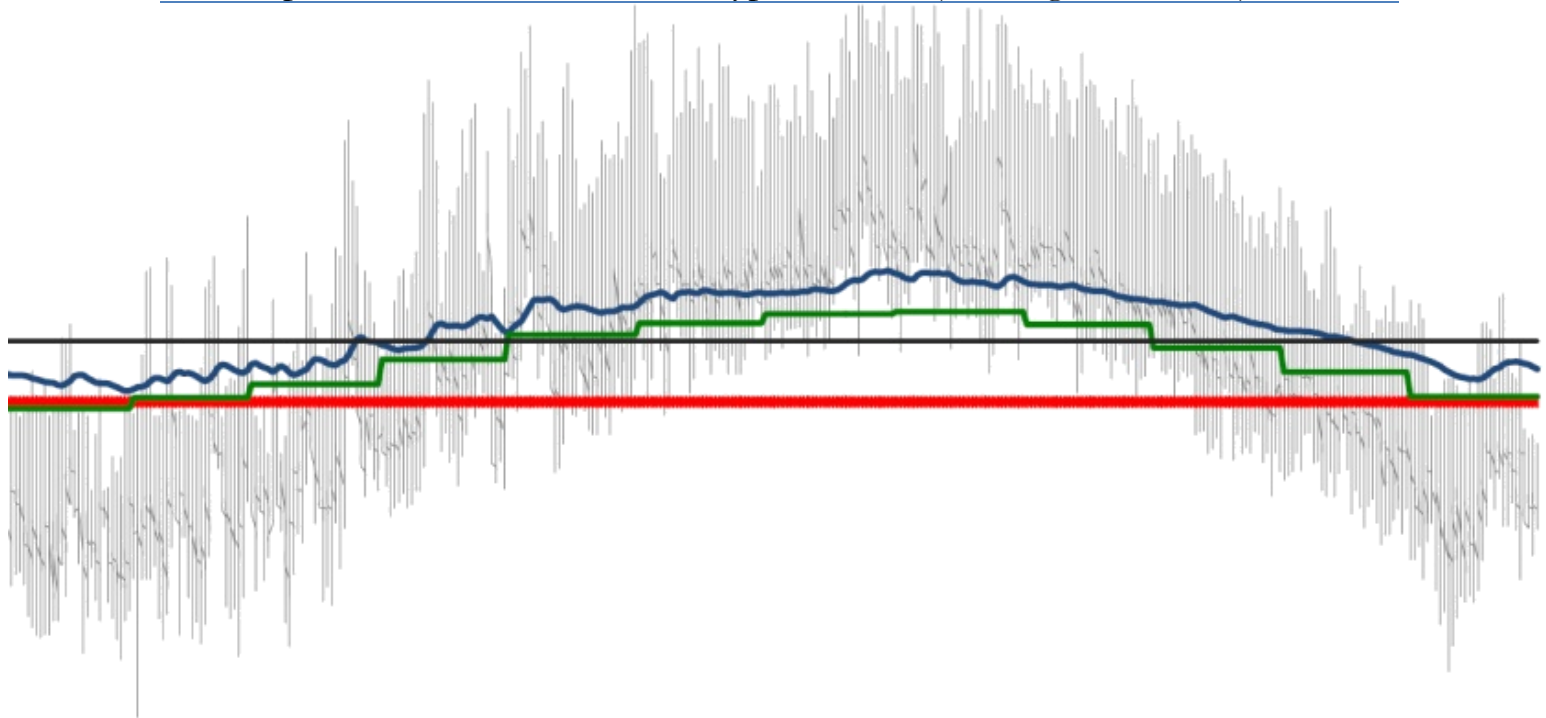




« Etude de l'impact des modèles de confort sur la consommation énergétique
pour les bâtiments NZEB's type bureaux (Cooling dominated) »



Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil Architecte par
HAMZA BELKHOANE.

Promoteur : Shady Attia.

Président du Jury : Pierre Leclercq.

Jury : Pierre Leclercq - Philippe Andre - Salvatore Carlucci.

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite exprimer ma reconnaissance à Shady Attia, mon promoteur qui par sa disponibilité, son encadrement et ses conseils m’a permis de mener à bien ce travail.

Je remercie bien évidemment les membres de mon jury, Philippe Andre et Salvatore Carlucci pour le temps qu’ils ont consacré à la lecture de ce mémoire, ainsi qu’à Pierre Leclercq membre et président de mon jury qui a joué un rôle très important tout le long de mon cursus à l’université de Liège et à qui j’adresse une pensée particulière et exprime une grande gratitude.

Dans un second temps, je souhaite remercier toutes les personnes qui m’ont aidé et ont contribué de près comme de loin à la concrétisation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, mes proches et plus particulièrement mes parents pour leurs soutiens, leurs encouragements et leurs sacrifices afin que je puisse continuer mes études à Liège et réaliser ce travail.

Résumé

Titre de la recherche : Etude de l'impact des modèles de confort sur la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's type bureaux (Cooling dominated).

Mots clés : Modèles de confort, confort thermique, climat chaud, consommation énergétique, environnement intérieur.

Face au développement des différents secteurs économiques qui induisent une consommation énergétique croissante, et qui ont pour résultat un rejet massif de gaz à effet de serre et l'augmentation de la température du globe. Plusieurs mesures ont été prises dans les différents domaines comme celui du bâtiment en développant des modèles de construction peu énergivore (NZEB) et différents modèles de confort afin de réduire l'empreinte carbone des bâtiments et leurs consommations d'énergie. Dans ce contexte, cet article se pose la question de savoir quel est le meilleur modèle de confort à recommander afin de réduire la consommation énergétique d'un bâtiment de type bureaux dans le climat chaud (cooling dominated) tout en garantissant le confort thermique intérieur. En effet, les études qui traitent de l'efficacité énergétique sont nombreuses, cependant celles la sont dans la plupart des cas appliquées aux climats tempérés ou froids et à peine explorées pour les climats chauds. L'objectif de ce papier est de (1) Mettre en parallèle à la fois les modèles de confort et la consommation énergétique dans les climats chauds, (2) Choisir le modèle de confort qui nous garantit la meilleure qualité d'environnement intérieure, (3) Comparer la consommation d'énergie du bâtiment pour chaque modèle et de choisir le moins énergivore. Afin de répondre à notre problématique, une méthodologie a été mise en place, qui passe par plusieurs phases. Tout d'abord (1) Identifier les différents modèles de confort à utiliser (ISO7730/ EN15251/ ASHRAE55 adaptatif/ Givoni), (2) Choisir et modéliser un bâtiment de référence de type bureaux, (3) Sélectionner 04 villes représentatives du climat chaud méditerranéen et aride (Alger/ Palerme / Le Caire/ Dubaï). En second lieu, une simulation a été lancée afin de générer les différents résultats souhaités sur la consommation d'énergie et la température opérative des différents modèles de confort dans les différentes villes. La dernière étape était de faire le comparatif des résultats et d'identifier au final la solution la plus adéquate qui nous permet d'optimiser notre consommation et garantir dans le même temps le confort thermique intérieur dans le bâtiment.

Abstract

Thesis title : Study of the impact of comfort models on energy consumption for NZEB's office buildings (Cooling dominated).

Keywords : Comfort models, Thermal comfort, Warm climate, Energy consumption, Indoor environment.

Several energy efficiency concepts and comfort models emerged in the last 15 years seeking high performance buildings and optimal occupant comfort conditions. The aim of high performance buildings is to reduce the carbon footprint and energy consumption of buildings while maintain a fit to purpose comfort. In this context, this work raises the question of fit to purpose comfort models that can from one side reduce the energy consumption of typical office buildings in hot climates (cooling dominated) while on the other side ensuring indoor thermal comfort. Indeed, studies that address energy efficiency are many, however it is in most cases applied to temperate or cold climates and barely explored for hot climates. The objective of this paper is to (1) combine several comfort models for a net zero energy building in hot climates, (2) select the comfort model that shows the optimal comfort quality of indoor environment and (3) compare the building's annual energy consumption for each used comfort model. To respond to our research problems, a methodology has been established, which goes through several phases. First identifying the different comfort models comfortable to use in hot climates (ISO 7730 / EN 15251 / adaptive ASHRAE / Givoni), secondly selecting a typical validated office building model as a reference building and finally selecting representative cities in the Mediterranean arid and hot climate (Algiers / Sicily / Cairo / Dubai). The study used building performance simulation to generate the different results on the energy consumption and the operative temperatures of the different models of comfort in each city. The paper ultimately identifies the fit to purpose comfort models for a medium size net zero energy office building in hot climates. The paper presents a comparison that can help building professional to identify the most appropriate comfort model that allows optimizing energy consumption, ensuring thermal comfort for robust performance of net zero energy buildings in hot climates.

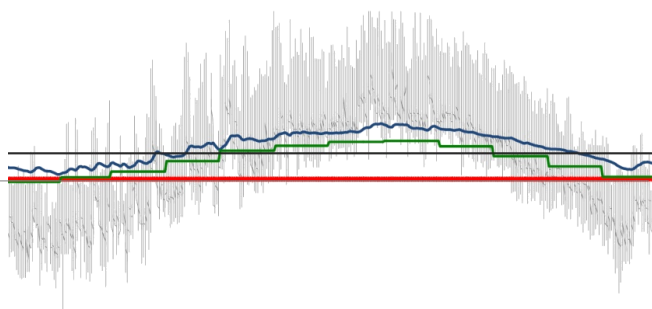
Table des matières

I- Introduction.....	8
II- Etat de l'art.....	14
1. Qu'est ce que le confort thermique?	14
1.1. Introduction	14
1.2. Définition du confort thermique.....	14
1.3. Les facteurs influençant le confort thermique	15
a) Facteurs physiques.....	15
b) Facteurs physiologiques	16
c) Facteurs psychologiques	19
d) Autres paramètres	19
- <i>La température de l'air</i>	19
- <i>L'humidité relative</i>	19
- <i>La vitesse de l'air</i>	19
- <i>La Température moyenne radiante</i>	20
- <i>L'habillement</i>	21
- <i>L'activité métabolique</i>	21
1.4. Les différentes approches du confort thermique.....	21
a) L'approche analytique (Fanger)	22
b) L'approche adaptative	24
1.5. Le confort thermique dans les normes.....	27

a) La norme ISO 7730	28
b) La norme ASHRAE 55	29
c) La norme EN 15251	31
d) La norme bioclimatique de Givoni.....	34
2. Le Confort VS L'efficacité énergétique, une relation complexe?	36
2.1. Introduction	36
2.2. Etat de l'existant	36
3. Conclusion générale.....	43
III- Méthodologie.....	46
1. Introduction	46
2. Protocole expérimental général	47
3. Etude de cas.....	49
3.1. Présentation du modèle.....	49
3.2. La modélisation	50
4. Choix du contexte	53
4.1. Classification climatique	53
4.2. Sélection des villes de test	57
a) Le Caire (Egypte)	58
b) Palerme (Italie)	59
c) Alger (Algérie).....	60
c) Dubaï (Emirats Arabes Unis)	61
5. Conclusion.....	62
IV- Résultats.....	65
1. Introduction	65

2. Distribution des températures	65
3. Besoin en chauffage et en refroidissement.....	71
V- Discussion.....	75
1. Analyse du profil	75
2. Potentiel énergétique	81
3. Liberté d'action	90
4. Acceptabilité des modèles adaptatifs.....	94
VI- Conclusion – Limitations	99
Bibliographie	103
Table des illustrations	108
1. Figues	108
2. Tableaux.....	110
Annexes	112

I NTRODUCTION



I- Introduction

Depuis plusieurs années et avec l'évolution des différents secteurs économiques et la course vers plus de développement et de croissance, en particulier dans les pays émergents tels que l'Inde, la Chine ou encore le Brésil, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter au fil des années comme le démontre la Figure 1 pour passer de 8791,37 Mtoe¹ en 1990 à 13737,61 Mtoe¹ en 2015 (Enerdata, 2016). L'essentiel de cette énergie étant d'origine fossile et donc polluante induit d'une part une raréfaction de ces ressources et d'autre part un rejet massif de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui est l'un des principaux facteurs du réchauffement climatique et de l'augmentation de la température du globe.

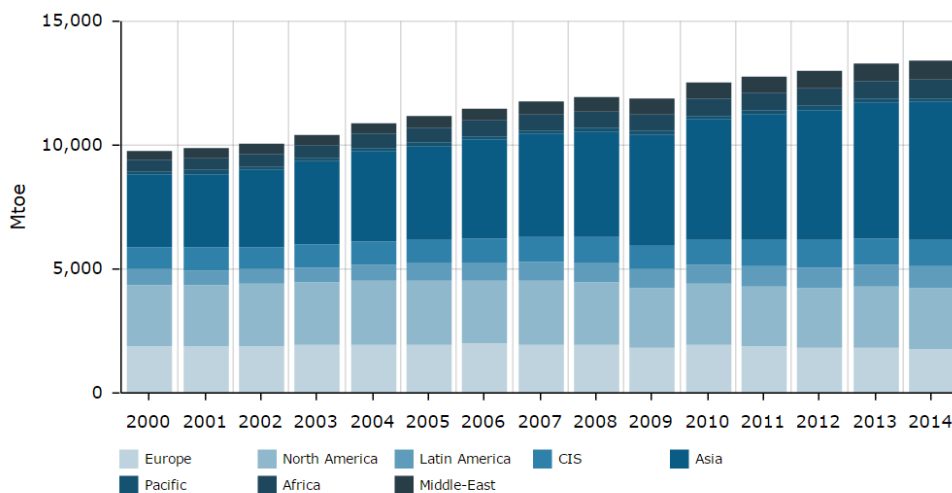


Figure 1: Consommation énergétique mondiale (Enerdata, 2016).

Pour lutter contre les impacts négatifs sur l'environnement et assurer ainsi la pérennité de notre modèle de vie à moyens et longs termes, il est nécessaire de réduire nos besoins énergétiques, notamment dans les postes les plus énergivores à savoir le transport et la construction. En effet, et si on prend comme référence l'union européenne, ces deux secteurs représentaient respectivement 31,6% et 26,8% de la consommation énergétique en 2013 (Eurostat, 2016), soit un total de 58,4%, comme l'indique la Figure 2.

¹ Mtoe : millions de tonnes-équivalent pétrole

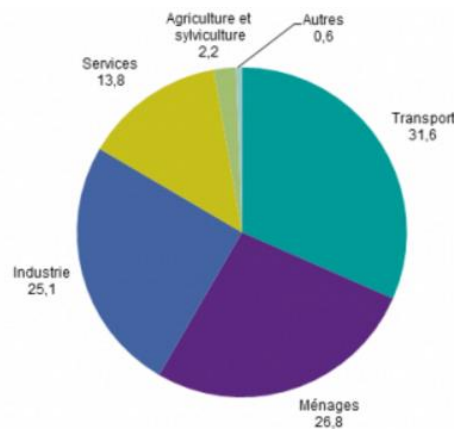


Figure 2 : Consommation totale d'énergie par secteur d'activité de l'UE-28, 2013-basé sur Mtoe (Eurostat, 2016).

Face à cette urgence, plusieurs mesures ont été prises au niveau mondial et européen pour tenter de réduire les dépenses énergétiques tel que le protocole de Kyoto en 1997 qui fixe des exigences en matière de réduction de gaz à effet de serre dans les pays industrialisés et les différentes directives européennes portant sur l'efficacité énergétique. La dernière en date étant la directive 2012/27/UE adoptée par le parlement et le conseil européen et publiée dans le journal officiel de l'UE le 14 novembre 2012, qui « *établit un commun pour la promotion de l'efficacité énergétique dans l'union en vue d'assurer la réalisation du grand objectif fixé par l'Union d'accroître de 20% l'efficacité énergétique d'ici à 2020* » (L'union, 2016).

Cela se traduit dans la construction par des bâtiments de plus en plus performants énergétiquement pour satisfaire les différentes normes et règles en vigueur, en allant jusqu'à atteindre des bâtiments « net zero energy » qui par définition ont une consommation minimale dans les différents postes à savoir le refroidissement, l'éclairage ou encore le chauffage (Attia & Carlucci, 2015) et peuvent même être autonomes énergétiquement grâce à une enveloppe très étanche à l'air, à haute résistance thermique et en étant raccordés à un réseau d'énergie renouvelable.

Afin d'atteindre ces standards, les pistes sont nombreuses et les solutions multiples, cependant il est essentiel de préserver dans le même temps la qualité d'air intérieur et le confort des occupants. Cet aspect a été introduit dans les normes pour garantir la qualité sanitaire de l'air dans les bâtiments mais aussi le bien être des occupants évitant ainsi l'apparition de maladies et syndromes tel que le syndrome du bâtiment malsain principalement dans les immeubles de bureaux qui se caractérisent par une accentuation de

symptômes tels que les maux de tête, irritation de la peau ou encore de nausée (Skov, 1992) impactant le rendement et la productivité des travailleurs. Or, il est possible d'accroître la consommation d'énergie en utilisant un système de refroidissement à cause de la surchauffe en période d'été et par extension dans les climats dit chauds afin d'assurer certains critères de confort (Attia & Carlucci, 2015).

C'est dans ce contexte que nous avons décidé de mener notre travail de recherche sur l'impact des différents modèles de confort sur la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's², et de se concentrer uniquement sur les bâtiments de types bureaux en climat chaud (cooling dominated), le but étant d'identifier le modèle de confort le plus favorable afin d'atteindre la meilleure efficacité énergétique dans ces bâtiments, et donc faire un comparatif des différents modèles et leur influence sur la consommation d'énergie dans le modèle étudié pour essayer de trouver la meilleure combinaison.

Avec la nécessité de minimiser les impacts environnementaux des bâtiments, ce mémoire de fin d'études s'inscrit dans une perspective d'investigation en mettant en parallèle à la fois les modèles de confort et dans le même temps la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's dans les climats chauds. En effet, les études liées aux bâtiments nearly zero energy sont assez récentes. On trouve dans la littérature différentes études qui ont été menées sur les modèles de confort et l'efficacité énergétique, cependant cela est dans la plupart des cas appliqués aux climats tempérés ou froids, et à peine explorés pour des climats chauds.

Dans l'optique de répondre à notre problématique, nous avons mis en place une méthodologie qui est basée sur deux éléments fondamentaux, à savoir la documentation et l'expérimentation par simulation informatique. Le document examine en premier lieu l'état de l'art qui nous permet d'identifier, définir et caractériser les éléments principaux qui structurent notre recherche à savoir les différents modèles de confort. Cette partie démontre qu'il existe différents modèles qui peuvent être regroupés dans deux grandes familles : la première analytique (statique) et la deuxième adaptative, basées sur des mécanismes différents et influencées par divers facteurs tels que les facteurs physiques, physiologiques ou psychologiques. L'état de l'art nous apporte un éclairage non seulement sur ces aspects de confort mais aussi sur la classification des climats et en particulier de type chauds basés sur celle de Koppen qui prend en compte la pluviométrie et la variation de température.

Le deuxième point abordé dans cette étude bibliographique sont les études similaires déjà effectuées sur l'impact de ces modèles de confort sur la consommation énergétique qui a

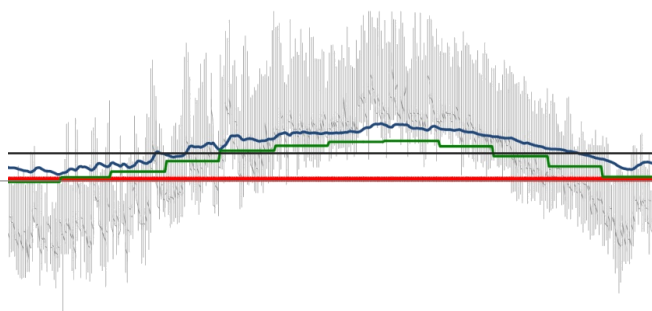
² NZEB's : Nearly zero energy buildings

pour but d’avoir une vision globale de leur influence sur la consommation suivant les différents types de bâtiments et climats.

Le document expose en second lieu le cas pratique qui consiste à une modélisation sur le logiciel DesignBuilder de notre bâtiment de référence sur lequel nous travaillerons dans la partie expérimentale du mémoire. Cette partie débute par la sélection du cas d’étude qui est un bâtiment de type bureaux se développant sur 05 étages avec à chaque étage 30 modules, on identifie par la suite les zones d’études en sélectionnant 04 grandes villes situées dans des climats chauds (méditerranéens et arides) suivant les classifications internationales après avoir modélisé le bâtiment. Cela a pour objectif d’évaluer la consommation d’énergie pour chaque modèle de confort et dans chaque zone d’étude choisie et de générer ainsi des résultats chiffrés pour chacune des configurations mentionnées.

L’analyse des résultats de la simulation est développée dans la troisième partie du mémoire et consiste à comparer les données tirées du cas d’étude et identifier au final la solution la plus adéquate qui nous permettra d’optimiser notre consommation.

ÉTAT DE L'ART



II- Etat de l'art

1. Qu'est ce que le confort thermique?

1.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons nous pencher sur la question du confort thermique, ce qui nous permettra de définir dans le cadre de notre problématique ce qu'est le confort thermique et quels sont les éléments qui peuvent l'influencer.

La question du confort thermique est assez complexe car elle prend en compte des éléments objectifs mais aussi subjectifs qui touchent la perception humaine, il est donc très important de comprendre les différents mécanismes qui interagissent avec cette notion de confort.

En second temps, nous présenterons les différentes approches et modèles de confort thermique, cela nous permettra d'effectuer la phase expérimentale de notre travail.

1.2. Définition du confort thermique

Dans la littérature, le confort thermique est défini de plusieurs façons différentes prenant en compte ou pas des différents éléments, le but étant selon De Dear (2004) d'offrir un climat intérieur sain assurant le bien être et n'affectant pas la productivité des utilisateurs.

Il est défini comme *«un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions de conduite pour corriger l'environnement par le comportement.. »* (Hensen, 1991, p.21) l'occupant ne préférant ni un environnement plus chaud ni plus froid et exprimant ainsi sa satisfaction vis-à-vis de son ambiance thermique (Attia & Hensen, 2014). On peut en déduire que le confort thermique est considéré comme un état d'équilibre entre le corps humain et son environnement ou les activités d'échanges thermiques entre les deux entités sont quasi nulles, Givoni (1978) parle de mécanismes de thermorégulation qui sont à un niveau d'activités minimales.

ASHRAE³ (2010) présente de la même façon le confort thermique sauf qu'il met en évidence l'aspect psychologique pour atteindre la sensation de confort et le définit comme étant

³ ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

avant tout « *un état de l'esprit dans lequel la satisfaction est exprimée vis-à-vis de l'environnement thermique* », ce qui ajoute un paramètre subjectif à la détermination de la notion de confort.

Au final, il n'existe pas de manière unanime et conventionnelle de définition de la notion de confort thermique, ce dernier repose d'une part sur des facteurs physiques d'échanges thermiques entre le corps humain et son environnement afin de créer un équilibre thermique et d'autre part sur des facteurs plus subjectifs, à savoir physiologiques et psychologiques qui diffèrent d'un individu à un autre et qui ont relation avec l'humeur, les facteurs sociaux et culturels, comportementaux et d'adaptations (Djongyang & al., 2010).

1.3. Les facteurs influençant le confort thermique

Le comportement du corps humain est en perpétuel dialogue avec un environnement thermique donné afin de garantir l'équilibre thermique et donc une température corporelle idéale de fonctionnement qui avoisine les 37°C et offrant ainsi le confort thermique recherché. Cela se traduit par un comportement et des réactions conscientes ou inconscientes faisant intervenir des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques.

a) Facteurs physiques

Ce facteur englobe les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement afin de maintenir une température corporelle de 37°C et d'assurer le bon fonctionnement des organes vitaux internes, appelés aussi l'homéostasie⁴.

L'être humain est considéré donc comme étant une machine thermodynamique ou la surface cutanée de la peau représente l'enveloppe et permet les échanges avec l'extérieur, à savoir l'environnement immédiat via différents modes d'échanges (convection, rayonnement, évaporation, respiration ou autres), les déperditions seront égales à la création de chaleur due à l'activité métabolique (Moujalled, 2007).

Si par exemple la température du corps augmente par rapport à sa température de consigne, le flux d'échange de chaleur entre ce dernier et l'extérieur augmente aussi dissipant ainsi la surchauffe du corps.

ASHRAE, cité par Moujalled (2007), exprime le bilan thermique comme suite :

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S$$

⁴ Homéostasie : Capacité que peut avoir un système quelconque à conserver son équilibre de fonctionnement (température interne) en dépit des contraintes qui lui sont extérieures.

Avec

M : Taux métabolique, W/m².

W : Travail externe, W/m².

Q_{res} : Flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m².

Q_{sk} : Flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m².

S : Taux de chaleur stockée dans le corps, W/m².

b) Facteurs physiologiques

S'ajoutant au facteur décrit précédemment, le facteur physiologique est le second facteur garantissant la neutralité thermique du corps humain. Cela est représenté par la thermorégulation que peut effectuer le corps afin de garantir une température idéale, et qui dépend non seulement de la variation interne de température due à l'activité métabolique (efforts physiques...etc.) mais aussi aux variations externes de température, vitesse de l'air, humidité...etc.

La thermorégulation est décrite selon Parsons (2003) comme étant un système dynamique qui a pour but de maintenir la température du corps à sa valeur de consigne, en maîtrisant les échanges de chaleur interne et externe. Elle se décompose en deux catégories, la thermorégulation végétative et la thermorégulation comportementale qui peut être consciente ou inconsciente.

La thermorégulation végétative appelée aussi génétique consiste à « *comparer les signaux en provenance des capteurs internes et cutanés à des valeurs de référence* » (Moujalled, 2007, p.25) pour adapter la réponse du corps. Cela revient à dire qu'il existe une boucle dynamique entre les thermorécepteurs⁵, le contrôleur⁶ et les actionneurs.

Bigouret (2012) décrit les diverses réponses d'ordre inconscient ou involontaire mises en œuvre par le corps pour réaliser la régulation de la façon suivante :

⁵ Les thermorécepteurs : capteurs révélant le refroidissement ou la surchauffe du corps, se situant au niveau de la peau ou à l'intérieur du corps.

⁶ Le contrôleur : représente l'hypothalamus qui est le centre thermorégulateur du corps, se situe au niveau du cerveau et ordonne des actions pour ajuster l'équilibre thermique du corps si il y'a un écart avec la valeur de consigne.

- *La sudation* permet de refroidir le corps en cas de surchauffe par évaporation, son intensité dépend non seulement de l'écart de température par rapport à la température de consigne mais aussi du taux d'humidité dans l'environnement extérieur (plus l'air est humide, plus le phénomène de sudation se réduit et l'évaporation de la sueur devient difficile).
- *La vasodilatation et la vasoconstriction* permettent respectivement d'élargir ou de rétrécir le diamètre des vaisseaux afin d'augmenter ou diminuer le débit sanguin, le but étant de répondre à la surchauffe par une augmentation de la perte de chaleur par convection via la peau ou au contraire pour répondre au refroidissement du corps de diminuer les échanges thermiques et d'éviter la perte de chaleur du noyau et des organes vitaux comme le montre la Figure 3.
- *La contraction musculaire* (connue comme sensation de frisson) est activée par le corps pour lutter contre le froid en changeant le taux métabolique et transformant l'énergie en chaleur en mettant les muscles en tension, réchauffant ainsi le corps.

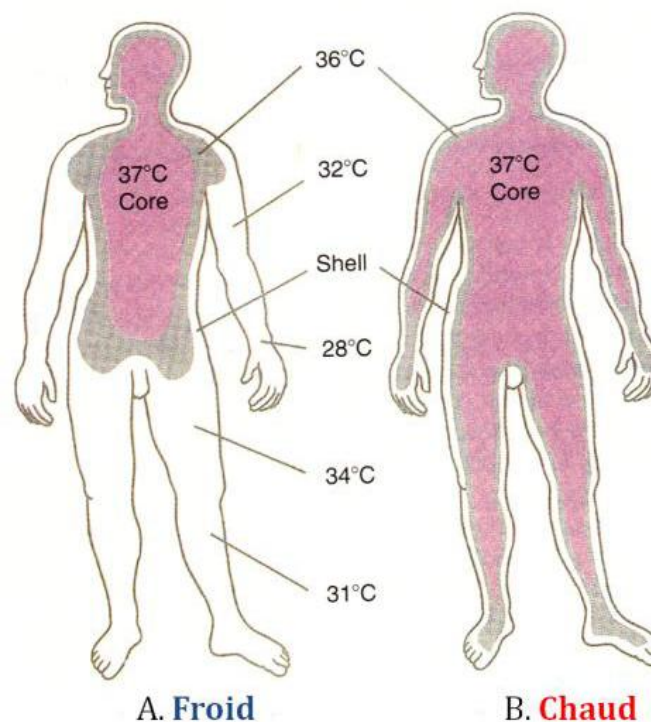


Figure 3: Gradient de température dans un environnement froid, et chaud. Etude de Wanger (cité par Bigouret, 2012, p.44).

La thermorégulation comportementale ou d'ajustement représente les différents changements que peut faire l'occupant pour améliorer son confort et assurer l'équilibre thermique en modifiant les flux de chaleur et de masse (Peeters & al., 2009), cela par des ajustements conscients comme par exemple agir sur son environnement immédiat en ouvrant les fenêtres, en changeant de local ou éventuellement sur son habillement ou son activité physique et métabolique (en se désaltérant par exemple), pour minimiser ainsi les inconvénients de la thermorégulation autonome perçue comme désagréable.

Tous ces différents mécanismes de contrôle sur la température du corps humain pour garantir la neutralité thermique nous démontrent toute la complexité de ce dernier, mais aussi son efficacité à maintenir une température stable de consigne et garantir un équilibre thermique malgré un éventail de paramètres environnementaux très large (Fanger, 1970).

La Figure 4 nous synthétise ces différentes boucles d'adaptation et de thermorégulation autonomes et comportementales.

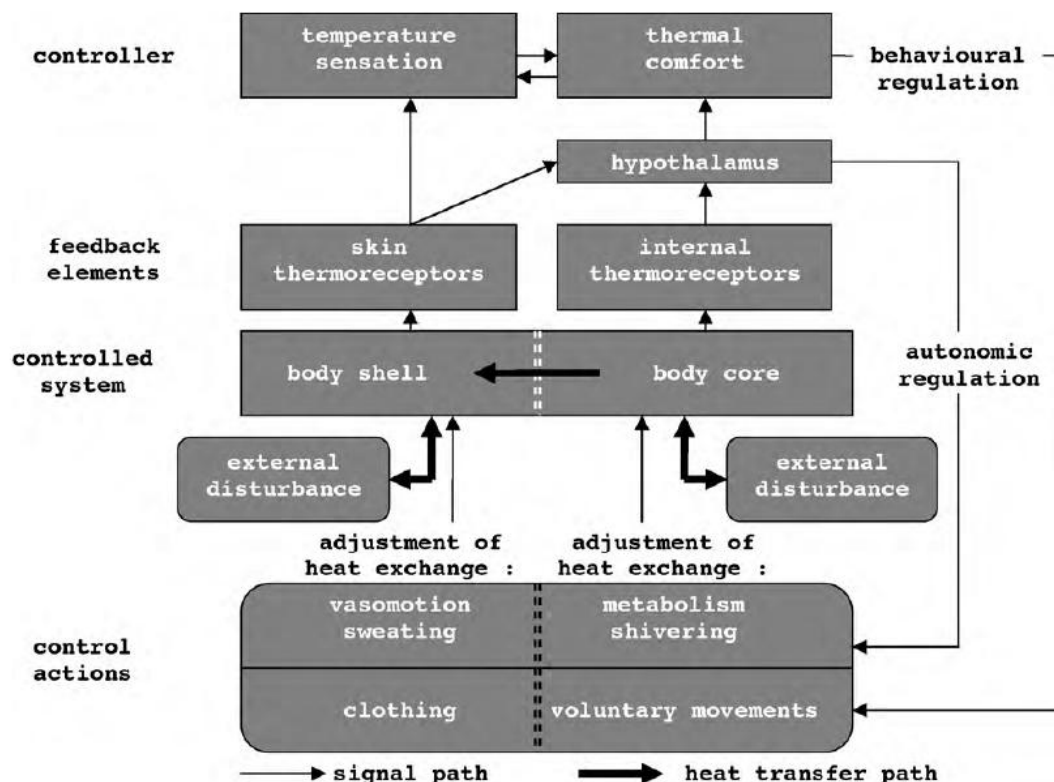


Figure 4: Schéma de la thermorégulation autonome et Comportementale (Djongyang & al., 2010, p.2633).

c) Facteurs psychologiques

Au delà des aspects thermiques et physiologiques mentionnés, il existe des facteurs d'ordre psychologique qui influent sur la perception du confort et qui diffèrent d'un sujet à un autre, basés sur une évaluation des paramètres socioculturels telle que l'expérience thermique personnelle ou encore le vécu, plutôt que sur des critères objectifs et absolus, appelés aussi « relativité perceptive » (De Dear, 2004). Une personne exposée à un environnement extérieur chaud et qui est amenée vers un local plus frais par exemple, peut exprimer une satisfaction et un confort envers son environnement alors que son équilibre thermique n'est pas encore atteint.

(Brager & De Dear, 1998) parlent quand à eux de satisfaction perçue qui est une interaction entre deux types de satisfactions, la première « anticipée » qui représente l'attente que peut avoir la personne vis à vis de son environnement et la deuxième « obtenue » qui est la condition thermique réelle du local.

Afin d'illustrer ces propos, nous prenons comme exemple l'étude de Rohles & Wells, citée par Mazari (2012) dans laquelle ils ont analysé des sujets dans des environnements de couleurs différentes et ont constaté que les personnes avaient plus chaud dans un environnement de couleur chaude (rouge) que ceux qui étaient dans un environnement de couleur bleue. Ces réponses disparates confirment l'importance du facteur psychologique (attente et cognitif) dans la perception du confort thermique et lui confère une valeur équivalente et une considération tout aussi grande que l'influence des facteurs physiques ou physiologiques.

d) Autres paramètres

- La température de l'air

Appelée aussi la température ambiante (T_a), elle caractérise l'environnement en contact immédiat avec l'individu, facilement mesurable (en degrés Celsius ou fahrenheit).

- L'humidité relative

Représente le rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air ambiant et la quantité maximale que peut contenir cet air à la même température, elle influence notamment les échanges évaporatoires entre le corps et l'environnement (Mazari, 2012). Elle est exprimée en % et il est recommandé de la maintenir entre $40\% < HR < 60\%$.

- La vitesse de l'air

Exprimée en m/s, elle joue un rôle très important dans la sensation d'inconfort et peut être la cause d'inconfort local lié aux courants d'air si elle dépasse 0.2m/s car cela augmentera les pertes de chaleur par convection (Taleghani & al., 2013) et évaporation, néanmoins dans les bâtiments la vitesse de l'air dépasse rarement cette valeur.

- La Température moyenne radiante

C'est une grandeur qui n'existe pas réellement mais qui peut être obtenue en fonction des températures des 6 parois suivant l'équation ci après, elle est définie comme étant « *la température uniforme d'une boîte noire imaginaire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur radiante que dans un espace réel non uniforme* » (ASHRAE, 2010, p5).

$$T_{rm} = \sum_j S_j T_{sj} / \sum_j S_j$$

Avec

T_{mr} : Température moyenne radiante, °C.

S_j : La surface de chaque paroi, m².

T_{sj} : Température de chaque paroi, °C.

Elle peut être mesurée d'une autre façon en utilisant la température opérative (T_{op}) qui représente une température prenant en compte les effets convectifs et radiatifs entre la personne et l'environnement (Mazari, 2012) suivant l'équation :

$$T_{op} = \alpha T_a + (1 - \alpha) T_{mr}$$

Avec

T_{op} : Température opérative, °C.

T_a : Température de l'air, °C.

T_{mr} : Température moyenne radiante, °C.

α : Coefficient dépendant de la vitesse de l'air ($\alpha = 0.5 + 0.25 * V_a$)

Notons que si la vitesse de l'air est inférieure à 0.2m/s, la température opérative T_{op} peut être exprimée comme suit :

$$T_{op} = (T_a + T_{mr}) / 2$$

- L'habillement

Représente les vêtements portés par une personne et qui peuvent créer une résistance thermique modifiant ainsi les échanges de chaleur entre le corps (la peau) et l'environnement. Son rôle principal est de préserver la chaleur du corps et maintenir des conditions acceptables en particulier en hiver (Moujalled, 2007), il est exprimé en clo et varie de 0 ou la personne est considérée comme nue à 3 ou même 4 pour un vêtement lourd approprié aux régions polaires (Taleghani & al., 2013). $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$.

- L'activité métabolique

L'activité métabolique est définie comme la production de chaleur interne du corps par heure et par m^2 de surface au repos ou bien du à une activité, elle se réfère à toutes les réactions chimiques produites dans l'organisme mais aussi à cause de l'activité de la personne (Taleghani & al., 2013). Elle est exprimée en met qui correspond à 58.2 W/m^2 , le Tableau 1 ci dessous reprend quelques valeurs en fonction de l'activité réalisée.

Activité / Tache	Valeur « met. »
Etendu couché	0.8
Lecture / Ecriture / Assis	1
Debout	1.2
Assis avec activité de bureau	1.3

Tableau 1: Valeur de l'activité métabolique « met » suivant différentes taches.

1.4. Les différentes approches du confort thermique

Avec l'évolution des exigences en terme de confort intérieur des occupants, les chercheurs et au cours du siècle précédent ont réalisé diverses expériences et se sont penchés sur cette notion de confort thermique afin de trouver des modèles et solutions pour les évaluer.

Il existe dans la littérature deux grands courants qui se sont développés et qui ont été introduits dans les diverses normes internationales pour satisfaire le confort intérieur.

La première de ces méthodes est celle de Fanger, appelée aussi statique ou analytique basée sur le bilan thermique et les divers échanges du corps avec l'environnement dans lequel il évolue afin de garantir son équilibre, la seconde est la méthode adaptative qui est basée sur l'interaction de l'occupant avec son espace et met le principe d'adaptabilité comme élément central du confort thermique.

a) L'approche analytique (Fanger)

Depuis le début du 20^{ème} siècle, il a été démontré que le sentiment de confort thermique de l'être humain est en relation avec le niveau d'activité de son système de thermorégulation, il a été prouvé par la suite que cette sensation thermique est liée à la température de la peau qui pour assurer des conditions physiologiques de confort doit être entre 33°C et 34°C sans phénomène de sudation (Fanger, 1973) suivant un niveau d'activité et d'habillement donnés. C'est sur ces bases que dès les années 1970, Fanger expérimente les chambres climatiques contrôlées sur 1296 étudiants danois exposés à des environnements thermiques différents et développe son modèle de confort statique fondé sur la thermorégulation, qui garantit une température corporelle stable en utilisant des processus physiologiques « *afin de maintenir un équilibre entre la chaleur produite par le métabolisme et la perte de chaleur du corps* » (Charles, 2003, p.7), qui a pour résultat une sensation thermique neutre.

Fanger a établi un modèle mathématique afin d'évaluer le confort thermique et quantifier ces échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement combinant les six variables d'entrées représentant les principaux paramètres de confort, à savoir les quatre grandeurs physiques liées à l'environnement (la température de l'air ambiant, la viscosité de l'air, l'humidité relative et la température moyenne radiante) décrites dans la section précédente (section 1.3.d) mais aussi les deux variables personnelles (l'habillement et le niveau d'activité métabolique), représentées par le bilan thermique et qui peut être développé pour nous donner l'équation suivante :

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

Avec

M : Taux métabolique, W/m².

W : Travail externe, W/m².

$C + R$: Perte de chaleur sensible par la peau, W/m².

C_{res} : Taux de perte de chaleur par convection respiratoire, W/m².

E_{res} : Taux de perte de chaleur par évaporation respiratoire, W/m².

S_{sk} : Taux de stockage de la chaleur dans la peau, W/m².

S_{cr} : Taux de stockage de la chaleur dans le noyau (corps), W/m².

A partir de cette équation d'équilibre thermique et de ces expériences en chambres climatiques contrôlées ou finalement les personnes sont passives et n'ont aucun pouvoir de contrôle ni de décision sur leur environnement, Fanger a élaboré un indice appelé PMV (Predicted Mean Vote) représentant « *la sensation thermique moyenne éprouvée par un large groupe d'individus sur l'échelle de sensation thermique d'ASHRAE* » (Cantin & al., 2005, p.3). Cette échelle subjective d'évaluation comporte sept degrés et varie de - 3 qui représente une sensation qualifiée de très froid, à +3 ou la personne évaluée estime avoir très chaud comme représenté dans la Figure 5.

-3	-2	-1	0	1	2	3
cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot

Figure 5: Echelle de sensation et d'évaluation thermique PMV d'ASHRAE (Charles, 2003, p.7).

L'indice PMV a pour but de prédire le confort thermique des occupants dans un environnement donné et de déterminer une température de confort appropriée, cependant il est tout à fait normal que des conditions jugées comme confortables pour certaines personnes, ne le soient pas pour d'autres même si elles évoluent dans un seul et unique espace commun car les perceptions individuelles sont différentes. En effet, Humphreys & Nicol (2002) ont démontré qu'il pouvait y avoir jusqu'à 1 unité de différence sur l'échelle de la sensation thermique d'ASHRAE dans un même groupe soumis à un même environnement et aux mêmes conditions thermiques, ce résultat est tout autant vrai dans le travail de Fanger & Langkilde, cité par Charles (2003) ou ils avaient constaté des disparités dans l'appréciation du confort allant jusqu'à 1.15°C.

Fanger a donc créé pour quantifier le pourcentage d'insatisfait par les conditions thermiques de leur environnement et qui sont dans un état d'inconfort l'indice PPD (Predicted percentage of dissatisfied) qui est lié à l'indice PMV par l'équation :

$$PPD = 100 - 95 \exp [-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]$$

Cette équation est représentée graphiquement par la Figure 6.

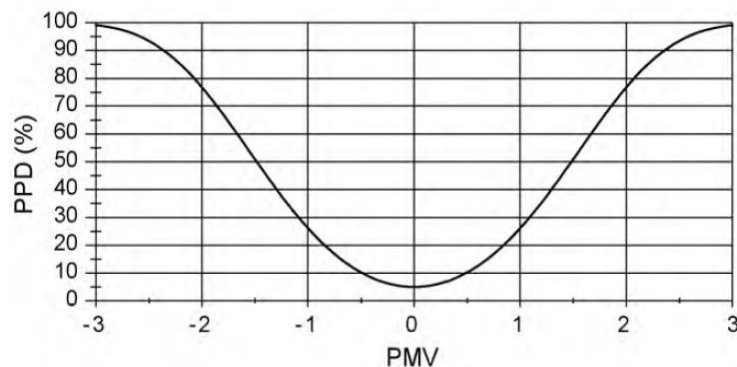


Figure 6 : Représentation PPD en rapport avec le PMV d'après la norme ISO 7730 (Djongyang & al., 2010, p.2629).

On peut remarquer avec ce graphique que Fanger a bien pris en compte les différences d'appréciations des personnes vis-à-vis de leur environnement thermique car même avec un PMV égal à 0 qui traduit une sensation de neutralité thermique, le pourcentage de PPD est toujours supérieur à 0 % (= 5 %), ce qui désigne qu'il y aura toujours des personnes insatisfaites de leur environnement intérieur en raison de leurs diverses sensibilités thermiques et leurs variables biologiques (Fanger, 1973), cela aurait été irréaliste si le PPD pouvait atteindre les 0 %. En raison de ces disparités, le modèle (PMV/PPD) ne fixe pas des conditions parfaites ni un confort thermique ni une température idéale bien définie et précise mais au contraire et comme le démontre la Figure 7 une zone de confort avec une plage de température opérative qui satisfera le plus grand pourcentage possible de personnes (Fanger, 1973; Attia & Carlucci, 2015), fixé ici à 80 % des occupants et donc un PPD de 10% ($-0.5 < PMV < +0.5$) en sachant que les 10% restant sont dus à un inconfort thermique local.

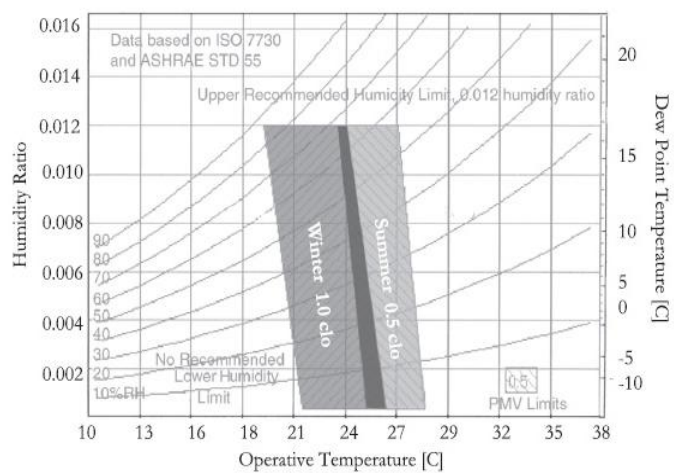


Figure 7 : Zone de confort thermique suivant le taux d'humidité et la température opérative (Taleghani & al., 2013, p.208).

b) L'approche adaptative

Bien que l'approche analytique constitue un moyen de définir le confort intérieur des occupants et satisfaire leurs exigences en matière d'ambiance thermique en contrôlant les variables physiques et personnelles par un modèle physique et physiologique, cela reste imprécis et inadapté pour certaines situations. En effet, il a été démontré par plusieurs

études que les conditions strictes d'études en laboratoire des chambres climatiques ne correspondaient pas à la réalité sur le terrain car elles ne prennent pas en compte plusieurs éléments telles que l'adaptabilité des occupants et l'interaction avec leur environnement immédiat, mais aussi l'aspect psychologique et socioculturel de ces derniers.

Des les années 1980, ASHRAE a mené des études sur le terrain (ASHRAE RP-884) afin d'évaluer la robustesse du modèle de Fanger sur 160 bâtiments repartis sur l'ensemble du globe représentant des zones climatiques différentes (De Dear & Brager, 2002), la Figure 8 représente la distribution géographique des bâtiments étudiés.

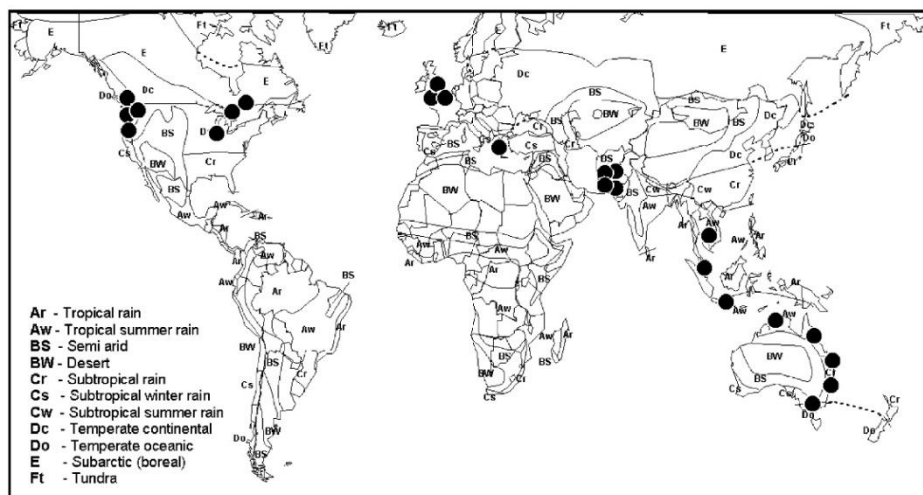


Figure 8 : Distribution géographique des bâtiments étudiés servant de base pour le modèle adaptatif (De Dear & Brager, 2002, p.551).

Les résultats de cette étude ont dévoilé une inexactitude (surestimation ou sous-estimation) des températures de confort par le modèle PMV dans les bâtiments ventilés naturellement car les occupants de ces immeubles supportaient des températures plus élevées ou plus faibles et avaient tendance à accepter une plus large variation de températures traduisant une plus faible receptibilité aux variations d'ambiance intérieure (Attia & Carlucci, 2015), contrairement aux bâtiments climatisés où le modèle de Fanger (PMV) était efficace dans la prédiction des températures de confort des occupants comme l'illustre la Figure 9.

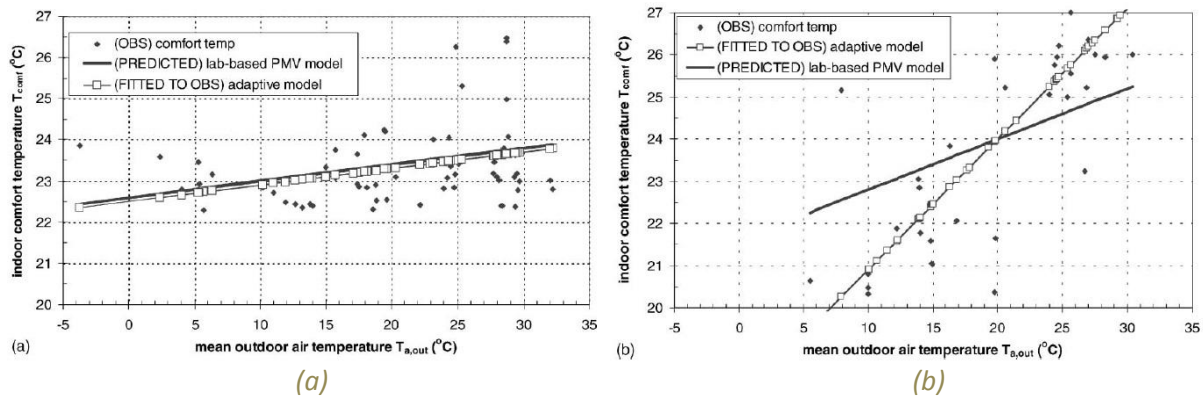


Figure 9 : Estimation du confort statique/ adaptative pour les bâtiments climatisés (a) et ventilés naturellement (b) (De Dear & Brager, 2002, p.552).

Ces différences s'expliquent par le fait que les bâtiments climatisés Figure 9 (a) se rapprochent de la configuration des tests effectués par Fanger dans les chambres climatiques menées en laboratoire avec un environnement scellé, contrôlé à régime quasi statique et stationnaire, d'où la corrélation entre la prédiction PMV et les mesures sur terrain. Cependant, dans les bâtiments ventilés naturellement Figure 9 (b) les disparités sont flagrantes faisant apparaître les limites du modèle de Fanger, en effet dans la réalité les occupants ne sont pas statiques et évoluent dans un environnement dynamique en relation avec la température extérieure ou ses différents paramètres sont en fluctuation perpétuelle l'obligeant à interagir avec ce dernier afin de garantir sa neutralité thermique, s'il ressent un inconfort, l'occupant a tendance à agir pour rétablir l'équilibre (Yang & al., 2014). Ainsi, il peut ouvrir les fenêtres, changer son habillement, boire une boisson fraîche qui modifiera son taux métabolique...etc., et aura donc plus de possibilités à trouver une configuration lui apportant le confort recherché, en créant en dehors des facteurs physiques, des boucles rétroactives d'ajustement comportementales conscients ou non, d'acclimations ou d'accoutumances décrites dans les sections précédentes (section 1.3.b - c) qui diffèrent de la causalité linéaire (physique => physiologique => confort) du modèle de Fanger et la mettant en doute (Cantin & al., 2005).

L'efficacité d'adaptabilité de l'occupant et sa capacité à modifier son comportement et son environnement afin d'atteindre son confort, ce qui représente la base et les fondements de l'approche adaptative a été prouvé dans plusieurs études comme celle de Van Der Linden & al. (2002) au Pays Bas décrivant l'étude du GBA⁷, où les températures limites estimées pour le confort intérieur des occupants peuvent atteindre les 27 °C au lieu de 25.5 °C en ouvrant les fenêtres, générant une vitesse de circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment ventilé

⁷ GBA : Government Buildings Agency (Netherlands).

naturellement plus importante réduisant la sensation de chaleur, mais aussi diminuant le niveau d'habillement qui passe de 0.7 clo qui est la valeur recommandée en été à 0.5 clo lorsqu'on a une sensation d'inconfort et lorsqu'on atteint un certain niveau de température.

S'ajoutant à cela l'adaptation psychologique des personnes (section 1.3.c) au climat intérieur qui est plus élevé dans les bâtiments ventilés naturellement que celles des bâtiments avec système de refroidissement actif car dans le premier cas le sentiment du niveau de contrôle et de la maîtrise de l'environnement immédiat sont plus grands, les expériences récentes des personnes et leurs attentes influent sur leurs perceptions de confort et leurs tolérances de plage de températures plus large qui reflètent plus les changements et la diversité du climat extérieur, comme par exemple une personne qui est exposée à un environnement chaud pendant un certain temps et qui le considère comme confortable sentira un inconfort si elle rentre dans un local climatisé alors que les personnes qui y sont déjà sont dans une situation de confort, ce qui explique que dans un bâtiment scellé avec un système de climatisation, les occupants sont plus exigeants vis-à-vis de leur environnement intérieur et supporte moins des écarts et fluctuations de températures et deviennent plus adaptés à des bandes étroites de confort thermique fournies justement par le système de conditionnement mécanique (De Dear & Brager, 2002). Notons que ces disparités dans la sensation de confort sont aussi géographiques entre le nord et le sud, les personnes qui ont vécu au fin fond du désert sont plus aptes à supporter des températures plus chaudes que ceux évoluant au Groenland par exemple, et au contraire ceux de l'hémisphère nord qui évoluent dans des environnements froids supportent mieux les températures basses que ceux de l'hémisphère sud.

1.5. Le confort thermique dans les normes

Comme décrit dans la section précédente, beaucoup d'efforts et d'études ont été faits afin de prédire la gamme de températures pour assurer les conditions intérieures de confort des occupants, cela s'est traduit par des expérimentations en laboratoire pour réaliser un modèle de confort à régime stationnaire, appelé aussi modèle analytique de Fanger, mais aussi l'élaboration d'un second modèle de confort adaptatif dynamique qui prend en compte l'interaction de l'occupant avec son environnement et avec d'autres paramètres physiologiques, psychologiques et socioculturels qui découlent de relevés et études sur terrain.

Ces deux principales approches ont été introduites dans différentes normes internationales telles que la norme ISO7730, la norme américaine ASHRAE55, la norme européenne EN15251 ou encore le modèle bioclimatique de Givoni pour servir de ligne directrice que ce soit dans la recherche ou la pratique afin d'évaluer le confort intérieur des occupants.

Nous allons essayer dans cette partie du mémoire de passer en revue ces différentes normes citées et leurs exigences en matière de confort thermique.

a) La norme ISO 7730

La norme ISO⁸ 7730 se penche sur l'étude du confort et des conditions acceptables à l'intérieur des bâtiments et propose une évaluation de l'ambiance thermique en se basant sur la méthode analytique de Fanger qui se réfère à l'indice PMV /PPD décrits précédemment (section 1.4.a) impliquant l'influence des 6 paramètres environnementaux et personnels à savoir la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité relative, la température moyenne radiante, l'habillement et l'activité métabolique (section 1.3.d) afin de prédire la sensation thermique des personnes exposées. La méthode analytique a été introduite dans la norme en 1984 et indique la température de référence qui doit être maintenue en été ou en hiver dans le bâtiment (Attia & Carlucci, 2015) selon un niveau d'activité < 1.2 met, un niveau d'habillement égal à 0.5 clo pour la saison estivale et à 1 clo pour des conditions d'hiver et un taux d'humidité 40%<HR<60% comme le suggère le Tableau 2.

Season	Clothing insulation (clo)	Activity level (met)	Optimum operative temp. (°C)	Operative temp. range (°C)
Winter	1.0	1.2	22	20–24
Summer	0.5	1.2	24.5	23–26

Tableau 2 : Températures opératives recommandées basées sur la norme ISO7730 (Taleghani & al., 2013, p.203).

Elle prédit que pour être dans une zone de confort acceptable le PMV doit être entre -0.5<PMV <+0.5, soit un PPD de 10%, cependant la norme offre 3 catégories différentes relatives à 3 niveaux d'exigences en terme de confort (Tableau 3), la température optimale recommandée reste la même pour les différentes classes mais la plage de température acceptable varie suivant l'acceptation d'un pourcentage plus ou moins élevé d'insatisfait (Peeters & al., 2009).

⁸ ISO : Organisation internationale de normalisation.

Category	Thermal state of the body as a whole		Local thermal discomfort			
	PPD (%)	PMV	Draught rate, DR (%)	Vertical air temperature difference (%)	Warm or cool floor (%)	Radiant temperature asymmetry (%)
A	<6	$-0.2 < PMV < +0.2$	<15	<3	<10	<5
B	<10	$-0.5 < PMV < +0.5$	<20	<5	<10	<5
C	<15	$-0.7 < PMV < +0.7$	<25	<10	<15	<10

Tableau 3 : Estimation du pourcentage PPD et l'intervalle PMV pour les 3 catégories suivant le confort général et l'inconfort local (Olesen & Parsons, 2002, p.542).

Notons que l'inconfort local est pris en compte dans cette norme par des conditions additionnelles et que les prescriptions recommandent d'utiliser la norme ISO7730 pour des bâtiments à régime quasi stationnaire scellés déconnectés de l'environnement extérieur et avec un système de climatisation et de conditionnement d'air actif.

b) La norme ASHRAE 55

La norme américaine ASHRAE 55 fait partie des différents standards d'évaluation des conditions environnementales intérieures des bâtiments, son rôle est de « *définir les combinaisons entre l'environnement intérieur et les facteurs personnels qui engendreront les conditions thermiques acceptables pour 80 % ou plus des occupants de l'espace intérieur.* » (De Dear & Brager, 2002, p.1). En effet, elle se basait dans sa version antérieure sur l'équilibre thermique du corps humain influencé par les 6 facteurs (4 environnementaux et 2 personnels) décrits par la méthode analytique (section 1.4.a), et intégrés dans la norme en 1982 (Attia & Carlucci, 2015).

Après les investigations et études sur terrain de De Dear et Brager, la norme a évolué et a introduit un nouvel aspect du confort intérieur à savoir l'adaptation qui montre qu'au delà des facteurs physiques, il existe d'autres éléments d'ordres psychologiques, comportementaux ou d'acclimations que pouvait avoir l'occupant influençant et garantissant son confort (section 1.4.b). Ainsi, l'approche adaptative est intégrée lors de la révision de la norme ASHRAE 55 en 2004 et propose une nouvelle équation d'évaluation ACS⁹ du confort intérieur en fonction de la température extérieure comprise entre 10 °C et 33 °C (Halawa & Van Hoof, 2012), qui est une expression mathématique du résultat et de la régression représentée dans la Figure 9 (b).

$$T_c = 0.31 \times T_o + 17.8$$

⁹ ACS : Adaptive comfort standard.

Avec

T_c : La température de confort (température opérative).

T_o : La température extérieure moyenne mensuelle.

Les températures exprimant la neutralité thermique déterminée, une plage de température de confort a été calculée représentant une acceptabilité de 80% qui traduit un niveau de confort typique et 90% si on désire un niveau plus élevé de confort, créant respectivement une bande moyenne de 5 °C à 7 °C basée sur la relation PMV/PPD (De Dear & Brager, 2002) illustré dans la Figure suivante :

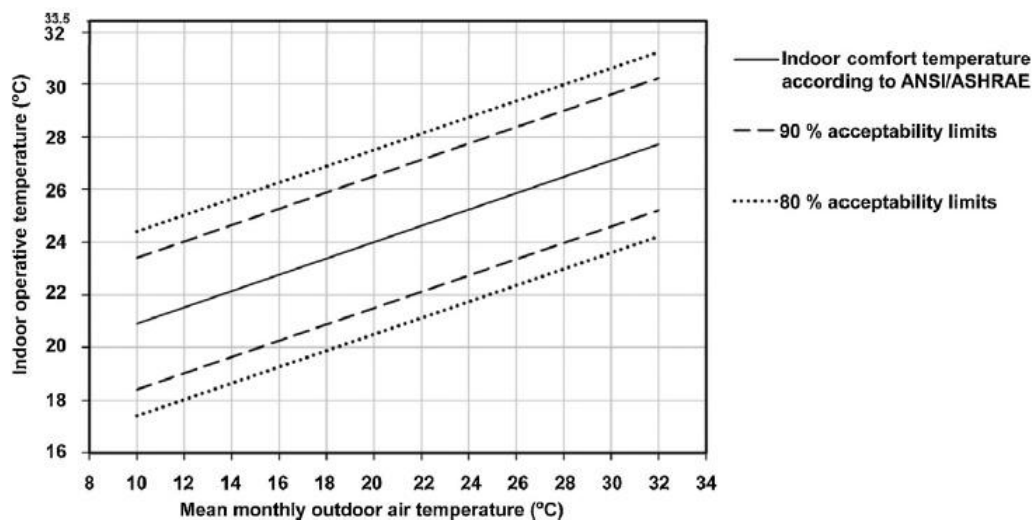


Figure 10 : Plage de Températures de confort intérieur en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle (Attia & Carlucci, 2015, p.120).

Notons que cette évaluation est faite avec un niveau d'activité < 1.3 met indiquant une activité sédentaire (de bureau) et une liberté pour l'occupant d'adapter son niveau de l'habillement en fonction de la température intérieure ou extérieure, la norme ASHRAE 55 recommande par ailleurs l'utilisation de ce modèle de confort à savoir le modèle adaptatif seulement dans les bâtiments sans système de refroidissement actif, la ventilation est assurée naturellement par l'occupant qui a une réelle possibilité d'interagir avec son environnement en disposant de fenêtres ouvrantes, pour les bâtiments scellés déconnectés de leur environnement extérieur ou il existe un système de chauffage et le refroidissement, la norme prescrit l'utilisation du modèle analytique de Fanger comme dans la norme ISO 7730.

c) La norme EN 15251

Suite à l'étude sur terrain réalisée sur différents bâtiments naturellement ventilés (free-running), climatisés ou mixtes à travers l'union européenne dans le cadre du projet européen traitant le confort thermique SCATs¹⁰, la norme EN15251 intitulée « *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* » a été produite et publiée par le CEN¹¹ qui a pour but de définir des paramètres d'entrées afin d'évaluer et assurer les conditions intérieures de confort acceptable des bâtiments tout en calculant leurs performances énergétiques pour au final réduire leur consommation et avoir des bâtiments plus performants en Europe (Taleghani & al., 2013) et compléter ainsi la directive EPBD¹².

L'étude SCATs a porté sur l'évaluation de 26 bâtiments repartis dans toute l'Europe représentant les différents climats possibles, les algorithmes représentant le confort adaptatif pour chaque pays sont repris dans le Tableau suivant :

Country	Adaptive control algorithm	
	$T_{rm} \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{rm} > 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
All	22.88 °C	$0.302 * T_{rm} + 19.39$
France	$0.049 * T_{rm} + 22.85$	$0.206 * T_{rm} + 21.42$
Greece	NA	$0.205 * T_{rm} + 21.69$
Portugal	$0.381 * T_{rm} + 18.12$	$0.381 * T_{rm} + 18.12$
Sweden	$0.051 * T_{rm} + 22.83$	$0.051 * T_{rm} + 22.83$
UK	$0.104 * T_{rm} + 22.85$	$0.168 * T_{rm} + 21.63$

Tableau 4: Les différents algorithmes du confort adaptatif pour chaque pays étudié (Taleghani & al., 2013, p.209).

Suite à ces relevés et aux différents algorithmes générés, une équation finale et globale a été établie afin de définir la température de confort adaptatif de la norme EN 15251 pour les bâtiments en free-running qui par définition sont des bâtiments qui ne consomment aucune énergie pour le chauffage et le refroidissement et donc assurent le renouvellement d'air par des moyens naturels comme l'ouverture des fenêtres par exemple, notons cependant qu'il a été admis comme bâtiment free-running ceux qui utilisent la ventilation mécanique afin d'augmenter le mouvement et la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment (Nicol & Humphreys, 2010).

¹⁰ SCATs : Smart controls and thermal comfort.

¹¹ CEN : Comité européen de normalisation.

¹² EPBD : European performance of buildings directive

$$T_c = 0.33 \times T_{rm} + 18.8$$

Avec

T_c : La température de confort (température opérative).

T_{rm} : La température extérieure moyenne journalière glissante pondérée.

Afin de calculer la température de confort, la norme EN15251 propose de la relier à la température extérieure par une expression différente que celle de la température moyenne mensuelle ou une température moyenne journalière maximale ou minimale, qui est la température extérieure moyenne journalière glissante pondérée T_{rm} qui d'après la norme est plus précise et est calculée par l'équation suivante (CEN, 2006):

$$T_{rm} = (1-\alpha) \{ \theta_{ed-1} + \alpha \theta_{ed-2} + \alpha^2 \theta_{ed-3} \dots \}$$

Cette équation peut être simplifiée et devient :

$$T_{rm} = (1-\alpha) \theta_{ed-1} + \alpha T_{rm-1}$$

Avec

T_{rm} : La température extérieure moyenne journalière glissante pondérée.

T_{rm-1} : La température extérieure moyenne glissante pondérée du jour précédent.

α : Constante entre 0 et 1. La norme EN15251 recommande de prendre $\alpha = 0.8$.

θ_{ed-1} : La température extérieure moyenne de la veille.

θ_{ed-2} : La température extérieure moyenne de l'avant-veille ainsi de suite.

Il est possible de simplifier ces équations si les données ne sont pas disponibles afin de calculer la T_{rm} (CEN, 2006).

$$T_{rm} = (\theta_{ed-1} + 0.8 \theta_{ed-2} + 0.6 \theta_{ed-3} + 0.5 \theta_{ed-4} + 0.4 \theta_{ed-5} + 0.3 \theta_{ed-6} + 0.2 \theta_{ed-7}) / 3.8$$

Notons que la température moyenne quotidienne du jour en question n'est pas prise en compte pour calculer la T_{rm} du même jour car en réalité elle ne peut pas être connue vu qu'il faut avoir toutes les températures de la journée pour établir cette moyenne et en particulier la maximale qui ne peut être atteinte qu'en début d'après midi entre 12h et 15h habituellement (Nicol & Humphreys, 2010).

Avec toutes ces équations et comme pour la norme ASHRAE 55, un graphique a été établi afin de visualiser et de déterminer les températures de confort pour la norme EN15251 dans un intervalle de température extérieure allant de 10°C à 30°C pour la limite supérieure et de 15°C à 30°C pour les limites inférieures, avec une activité sédentaire qui se traduit par un taux métabolique entre 1 met et 1.3 met, sans exigence vestimentaire stricte et précise afin de laisser libre choix aux occupants de modifier et d'adapter leur habillement, illustré dans la Figure 11, ainsi que les plages d'acceptabilité qui dans ce cas sont spécifiées selon la catégorie du bâtiment et de l'occupant (Tableau 5) avec une limite supérieure et inférieure, symétriquement à la température de confort optimal (Attia & Carlucci, 2015).

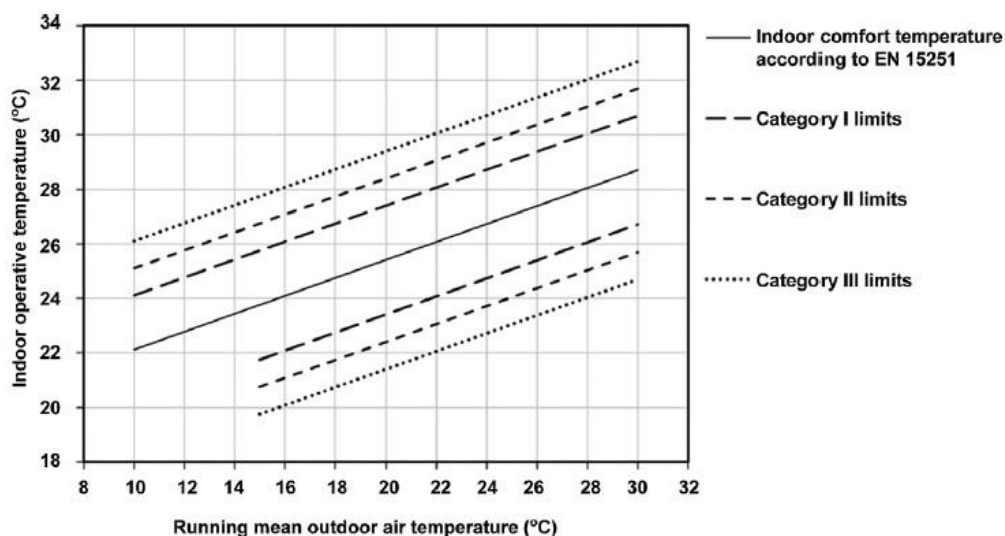


Figure 11 : Plage de Températures de confort intérieur en fonction de la température extérieure journalière glissante pondéré suivant les différentes catégories établie par la norme EN15251 (Attia & Carlucci, 2015, p.122).

Category	Explanation	Limit of deviation (°C)	Range of acceptability (%)
I	High level of expectation for very sensitive and fragile users (hospitals, ...)	± 2	90
II	Normal expectation for new buildings	± 3	80
III	Moderate expectation (existing buildings)	± 4	65
IV	Values outside the criteria for the above categories (only in a limited period)	$\pm > 4$	< 65

Tableau 5: Définition des différentes catégories et leur plage de température acceptable en fonction de la température de confort optimal (Taleghani & al., 2013, p.210).

Précisant que tout ce qui a été décrit précédemment pour la norme EN 15251 est valable pour des bâtiments free-running ou la possibilité d'adaptation existe et donc la capacité de l'occupant à interagir avec son environnement est réelle, cependant pour les bâtiments avec une gestion mécanique du confort intérieur à savoir un système de climatisation et chauffage, la norme EN15251 recommande comme la norme américaine ASHRAE 55 de se référer au modèle PMV/PPD de Fanger.

d) La norme bioclimatique de Givoni

Givoni aborde la notion de confort thermique principalement d'un point de vue du bien être de la personne, il se base sur les différentes études effectuées sur le bilan thermique et les échanges entre le corps et son environnement et suggère afin de garantir une sensation de confort acceptable pour l'occupant, un maintien de la température dans une bande étroite indépendante des variations larges de l'environnement extérieur (Givoni, 1978).

Il présente avec Milne un diagramme psychrométrique (BBCC¹³) représenté dans la Figure 12 afin de déterminer les zones de confort ou les stratégies passives peuvent être adoptées (Attia & Carlucci, 2015) suivant différents paramètres combinés entre eux car il considère que la notion de confort n'est pas liée seulement à la température extérieure mais aussi à l'humidité et la tension de vapeur d'eau qui déterminent le taux de sudation et au final les échanges du corps avec l'ambiance.

Avec ce diagramme, Givoni démontre que l'application des stratégies passives dans un bâtiment peuvent diminuer significativement l'impact du changement de l'environnement extérieur tel que le changement de la température ou de l'humidité et donc réduire au minimum l'effet d'inconfort que peut provoquer ces fluctuations garantissant ainsi le confort de l'occupant (Mazari, 2012). En effet, il découpe le diagramme en plusieurs zones la principale étant située au centre où le confort est assuré sans intervenir sur le bâtiment et mettre en œuvre des mesures particulières, les zones restantes traduisent des situations où il est impératif selon Givoni d'élaborer des stratégies passives comme la ventilation, la déshumidification ou encore l'inertie afin de compenser le déséquilibre créé par le changement d'ambiance et sauvegarder les conditions de confort. Néanmoins, différentes études ont indiqué l'inexactitude de cette méthode grâce à des simulations thermiques dynamiques (Attia & Carlucci, 2015).

¹³ BBCC : Building Bioclimatic chart

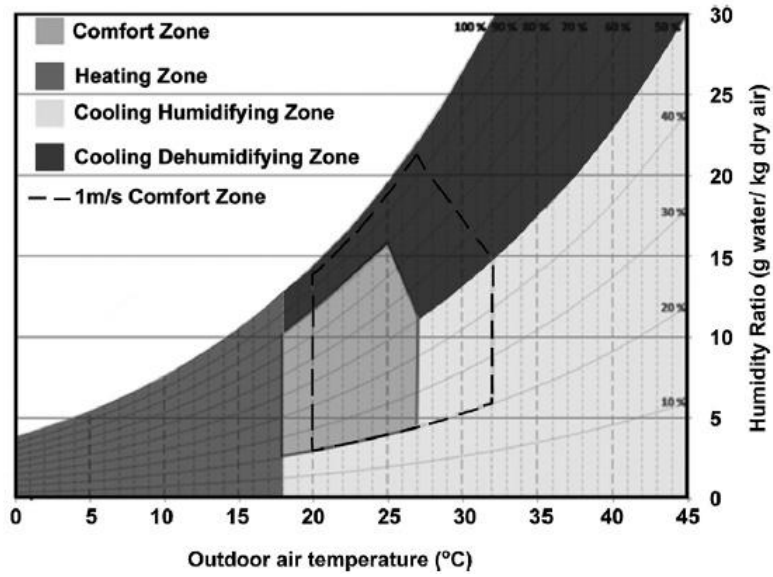


Figure 12 : Diagramme psychrométrique de Givoni (Attia & Carlucci, 2015, p.123).

2. Le Confort vs L'efficacité énergétique, une relation complexe?

2.1. Introduction

Il est important avant de faire notre expérimentation et passer à la partie pratique de s'attarder sur les conséquences de l'utilisation des différents modèles de confort introduit dans les différentes normes telles que la norme ISO7730, la norme américaine ASHRAE 55, la norme européenne EN 15251 ou encore le modèle de Givoni dans notre vie de tous les jours et en particulier dans la consommation d'énergie et dans notre façon de concevoir les bâtiments. En effet la question qui peut se poser est : est-ce qu'il existe une relation entre l'application des modèles de confort et la consommation énergétique ? Et si cette corrélation diffère d'un modèle de confort à un autre.

Dans le but de répondre avec précision à ces différentes questions à savoir l'impact des différents modèles de confort sur la consommation d'énergie en se focalisant particulièrement sur les immeubles de type bureaux dans le climat chaud développé dans la partie pratique du présent document, il est essentiel d'avoir une lecture préalable générale et globale sur ce qui a été déjà entrepris et fait sur le sujet du confort thermique et son influence sur la consommation d'énergie afin d'extraire des conclusions et d'éventuelles limitations et nous aider ainsi dans notre travail. Ceci va être détaillé dans cette partie.

2.2. Etat de l'existant

Dans la littérature scientifique et comme on a pu le démontrer dans les sections précédentes, des ingénieurs et scientifiques se sont penchés depuis déjà des décennies sur le confort thermique et l'ont étudié sur ses différentes formes analytiques et adaptatives, ils se sont aussi intéressés à évaluer leur efficacité sur la consommation d'énergie. Parmi ces études on peut citer celle de Henze & al. (2007) qui traitent dans leur article de plusieurs points tels que la maîtrise de masse thermique dans un bâtiment commercial (d'une superficie de 5141m²), le coût éventuel de l'utilisation du modèle adaptatif (EN15251, NPR-CR1752) et analytique (ISO7730) dans la gestion des températures de consigne ainsi que l'impact sur la consommation énergétique et cela dans la ville de Fribourg en Allemagne en période d'été et particulièrement lors d'épisodes météorologiques extrêmes, c'est pour cela notamment que le mois d'Aout 2003 a été sélectionné comme donnée d'entrée car on sait qu'à ce moment il y'a eu en europe une vague de chaleur et de canicule importante.

Cette étude a mis en avant l'effet positif de l'adoption du modèle adaptatif (EN15251) sur la consommation d'énergie qui a diminué de façon significative la charge de refroidissement du bâtiment de 14% à 17% et la sa consommation globale de 6 à 7% par rapport à l'utilisation du modèle ISO7730 conformément à des stratégies d'exploitation classique (stratégie de pré-refroidissement et du nighttime setup), le cout suit bien évidemment cette tendance mais dans une moindre mesure car les économies sont de 6% sur le modèle adaptatif, cette faible diminution peut s'expliquer par le fait que le cout est lié principalement à l'éclairage du bâtiment, le refroidissement vient en second lieu dans les postes de dépenses.

Notons enfin que l'effet de la vague de chaleur subie n'a pas d'incidence significative sur la charge de refroidissement mensuelle totale, cependant elle modifie sévèrement les charges de refroidissements maximales (de pointes) en les augmentant car des réductions de charges de refroidissement (et donc de consommation d'énergie) de l'ordre de 12 à 19% ont été observés lorsque l'onde de chaleur est rompue.

Dans le même registre et pour les immeubles de bureaux, il a été constaté selon l'étude de Van Hoof & Hensen (2007) qu'il y'avait un gain d'énergie de l'ordre de 10% sur l'ensemble de l'année pour un bâtiment naturellement conditionné utilisant le modèle adaptatif en comparaison avec un immeuble de bureaux muni d'un système HVAC. En effet, leur expérimentation discutait de l'intérêt de la mise en œuvre des modèles adaptatifs dans des immeubles de bureaux en terme d'utilisation d'énergie pour des zones climatiques situées au Pays-Bas (Eindhoven) et en République Tchèque (Prague) qui correspondent à des climats modérés classés Cfb et Cfc par la classification de Koppen. La diminution de la consommation d'énergie pour le modèle adaptatif a été prouvée quelque soit l'orientation des bureaux testés, cependant, ce bénéfice est significatif et le modèle efficace en période d'été ou les températures sont plus élevées contrairement aux périodes plus froides (d'hiver) ou les limites de ce type de modèle apparaissent à cause des températures extérieures beaucoup plus froides qui rendent difficile son application.

Le second problème qui se pose est l'applicabilité de ce type de modèle à savoir les modèles adaptatifs dans des pays comme le Pays-Bas car les immeubles de bureaux à ce jour sont en grande majorité munis de mécanismes de contrôle d'air intérieur et équipés de système de climatisation et peu d'entre eux peuvent satisfaire les exigences de la norme adaptative.

Les thèses établies par Sourbron & Helsen (2011) sur base de résultats produits dans leur recherche intitulé « *Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings* » convergent avec ceux vu précédemment dans le travail de Van Hoof & Hensen (2007) et tendent à les conforter et à les affirmer. En effet, l'étude est basée sur la simulation thermique d'un bâtiment de type bureaux constitué de 02 zones orientées Nord et Sud, situé à Maastricht (Pays-Bas) dans un climat modéré. Ces 02 zones représentent des locaux de bureaux d'une superficie de 37.8m² chacun. Les résultats démontrent l'efficacité des modèles adaptatifs et surtout celui introduit dans la norme européenne EN15251 avec une réduction de la consommation énergétique de 12% sur le poste de refroidissement pour les 02 zones en comparaison avec le modèle conventionnel ISO7730. Néanmoins ce qui est à souligner et ce qui a attiré notre attention est que l'utilisation d'un modèle adaptatif ne se traduit pas nécessairement par une diminution et une économie des besoins du bâtiment, dans cet exemple la consommation d'énergie pour le modèle de Fanger reste en dessous de celle du modèle adaptatif américain d'ASHRAE 55 ou celle du modèle adaptatif néerlandais ISSO74 pour les besoins en refroidissement, qui s'élèvent respectivement à un total de 42 kWh/m², 46 kWh/m² et 51 kWh/m² comme le suggère le Tableau 6. Sourbron & Helsen (2011) expliquent cela par le fait que pour les demandes en refroidissement la norme ASHRAE55 prend en compte la température moyenne mensuelle pour le calcul des limites de confort et comme il y'a peu de jours considérés comme très chauds dans le climat modéré tel que celui de Maastricht, les températures limites sont plus basses par rapport au modèle EN15251 ce qui réduit le bénéfice potentiel en énergie du modèle américain, la deuxième explication est que ces demandes en refroidissement sont aussi valables pour les périodes de mi saison et d'hiver.

	South zone		North zone		Total	
	Q_{heat}	Q_{cool}	Q_{heat}	Q_{cool}	Q_{heat}	Q_{cool}
ISO7730	26	84	34	41	30	63
	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ASHRAE55 _{adaptive}	23	86	28	43	26	65
	90%	103%	84%	104%	86%	104%
ISSO74	32	93	41	48	36	70
	124%	111%	120%	116%	122%	112%
EN15251 _{adaptive}	26	76	34	34	30	55
	100%	90%	99%	81%	100%	87%

Tableau 6 : Consommation d'énergie en (kWh/m²) et par rapport à ISO7730 (%) pour le chauffage et le refroidissement pour les 02 zones orientées nord et sud (Sourbron & Helsen, 2015, p.429).

Toutes ces analyses confirment le fait que les modèles adaptatifs sont moins applicables et leurs efficacités relatives et discutables dans des zones climatiques modérées telles qu'elles existent en Europe occidentale et centrale. Notons que même avec des données météo de l'année 2003 considérées comme extrêmement chaudes, le résultat final ne change pas même si le modèle adaptatif ASHRAE55 est en mesure d'abaisser la consommation d'énergie liée au refroidissement en été, toutefois cela est compensé par les besoins de refroidissement en hiver et en mi saison ce qui au final ne réduit pas la consommation globale pour le refroidissement.

Attia & Carlucci (2015) se sont concentrés sur un climat différent des scientifiques et chercheurs cités ci-dessus, qui est celui de la ville du Caire en Egypte caractérisée par un climat aride et désertique classé BWh suivant la définition de Koppen, l'objectif de leur étude est de quantifier l'influence des modèles de confort et la pertinence de leur utilisation dans un climat aride en évaluant les gains énergétiques apportés par ces derniers dans un bâtiment résidentiel zéro énergie constitué de logements. Une simulation thermique a été réalisée dans un appartement de référence d'une superficie de 120m² utilisant chacun des modèles de confort analytique et adaptatif afin de pouvoir faire une étude comparative. Le résultat (Tableau 7) met en évidence une disparité dans la consommation énergétique annuelle suivant le type de modèle de confort utilisé pour le chauffage et le refroidissement, ou le modèle analytique de Fanger introduit dans la norme ISO7730 est plus énergivore que tous les modèles adaptatifs qui réduisent les besoins de refroidissement de 10% à 18%.

Cela n'est guère surprenant en sachant que les modèles adaptatifs sont corrélés aux températures extérieures (très élevées pour ce type de climat) ce qui revient à avoir au final des seuils de températures de confort élevés pour ces modèles qui peuvent atteindre les 30°C par exemple pour le modèle bioclimatique de Givoni, cela engendre évidemment une diminution de la demande de refroidissement contrairement à la norme ISO7730 qui impose un haut niveau de précision et des plages de température de confort strictes et étroites augmentant la demande énergétique.

Comfort model	Annual energy consumption kWh/m ²
ISO 7730	58
ASHRAE 55	46
EN 15251	35
Bioclimatic comfort	24

Tableau 7 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et le refroidissement suivant les différents modèles de confort (Attia & Carlucci, 2015, p.125).

On peut dire qu'avec cette étude, Attia & Carlucci (2015) ont réussi à démontrer qu'au final les modèles de confort offrent de meilleurs résultats et un plus grand gain d'énergie dans des climats de types arides et chauds en mettant l'accent sur la grandeur du phénomène d'adaptation et de rentabilité du point de vue énergétique et qu'ils sont pensés pour être appliqués dans des climats où les températures sont élevées, à la différence des climats modérés tels que les climats européens où leur efficacité n'est pas évidente et sujet à débat.

En parallèle à ces études, d'autres investigations ont été entreprises sur le sujet du confort et des ambiances thermiques afin de garantir les exigences en termes de bien-être et de santé intérieure des occupants comme celle de Pfafferott & al. (2007) qui ont évalué le confort de 12 bâtiments de bureaux basse énergie à fonctionnement mixte situés en Allemagne et ont traduit dans leurs résultats en grande partie les mêmes théories que les autres études à savoir que le modèle adaptatif est plus efficace que celui de la norme ISO7730 dans des climats modérés et que les bâtiments à basse énergie offraient eux aussi un bon confort et cela par un refroidissement passif comme la ventilation nocturne...ect, néanmoins il est intéressant de noter que ce type de bâtiment utilisant les méthodes passives butte dans des périodes où le climat extérieur est anormalement chaud comme dans les périodes de canicule, un système de refroidissement mécanique (Water-driven cooling system dans cet étude) est nécessaire dans cette hypothèse car les températures intérieures augmentent fortement engendrant un inconfort.

Pfafferott & al. (2007) soulignent qu'il est impératif et même principal de prendre en compte le climat local et l'utilisation du bâtiment dans la conception pour pouvoir garantir au mieux le confort intérieur des occupants et précisent qu'il est possible suivant les résultats de leur étude d'assurer le confort avec un refroidissement passif dans les climats modérés comme le climat Allemand.

Les autres zones climatiques ne sont pas épargnées par ces études de confort thermique tel que le climat méditerranéen par exemple représenté par la ville de Bari au sud de l'Italie où Fato & al. (2004) ont mené leur expérimentation dans des bâtiments universitaires à air conditionné et à ventilation naturelle, le contexte climatique du sud de la France incarné par la ville de Lyon a été lui aussi pris comme base dans le papier de Moujalled & al. (2008) traitant de 05 immeubles de bureaux à ventilation naturelle, ou encore le désert de Libye et plus précisément dans l'oasis de Ghadames avec son climat chaud et sec d'Afrique du nord exposé dans l'article de Ealiwa & al. (2001) qui se penchent sur le confort et met en parallèle les maisons traditionnelles libyennes naturellement ventilées et les nouvelles constructions avec système de climatisation. Tous ces articles qui traitent de la perception thermique et du confort en comparant les différents modèles quelque soit la région, le climat et le contexte ou elles s'insèrent s'accordent à dire que l'indice PMV/PPD introduit dans la norme ISO7730 est efficace et estime très précisément le confort dans les bâtiments conditionnés mais est

incapable d'avoir la même rigueur quand il s'agit de ventilation naturelle et pointe du doigt son manque de fiabilité dans ce cas car il tend à surestimer ou sous-estimer les plages de températures ce qui appelle à plus de consommation d'énergie, le cas de Ealiwa & al. (2001) illustre ce manque de précision car le PMV prédit de l'inconfort dans les maisons traditionnelles et recommande un conditionnement d'air afin d'atteindre la température de confort prédite en période d'été alors qu'en réalité les personnes via un questionnaire sont totalement satisfaites de leur environnement intérieur, alors que le modèle adaptatif est plus avantageux du point de vue de la consommation et arrive à prédire le confort de façon plus juste dans les bâtiments naturellement ventilés.

Après l'exploration et l'analyse de toutes ces recherches menées sur les modèles de confort, leurs pertinences et leurs impacts sur la consommation d'énergie, le Tableau 8 résume ces études sélectionnées, similaires au travail qu'on essaiera d'entreprendre dans la partie expérimentale et met en évidence leurs limites et leurs éventuelles insuffisances.

Tableau 8 : Revue des études traitant des modèles de confort et des besoins d'énergie.

	Nom de l'article	Auteurs	Remarques
01	Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate	S.Attia, S.Carlucci	L'article se penche que sur les logements et prend qu'un seul cas d'étude à savoir la ville du Caire.
02	A review into thermal comfort in buildings	M.Taleghani M.Tenpierik, S.Kurvers, A.van den Dobbelsteen	La comparaison est faite dans cet article seulement entre les modèles de confort (T° de confort entre les modèles adaptatifs) sans prendre en compte la consommation énergétique, on ajoute que le cas étudié est celui de la ville de Bilt au Pays bas qui n'est pas classée comme climat chaud.
03	Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings	B.Moujalled, R.Cantin, G.Guarracino	Cet article est très intéressant car il traite de la qualité du confort thermique dans les bâtiments type bureaux dans le climat méditerranéen (est et sud de la France), cependant la consommation énergétique ne rentre pas dans le champ de l'étude et les bâtiments étudiés sont ventilés naturellement.
04	Thermal comfort in the climatic conditions of Southern Italy	I.Fato, F.Martellotta, C.Chiancarella	Même si l'étude aborde les cas de bâtiments publics ventilés naturellement mais aussi climatisés, elle se concentre que sur une comparaison entre les modèles de confort et n'explore pas leurs relations avec les besoins énergétiques.
05	Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their	M.Sourbron, L.Helsen	On remarque dans les résultats de cette étude que la consommation d'énergie pour le refroidissement n'est pas liée aux modèles de

	impact on energy use in office buildings		confort choisis (un léger gain pour la norme EN15251) pour des immeubles de bureaux mais cela est principalement dû au climat vu que cette étude est faite dans un climat tempéré type européen (Maastricht/Pays bas) et donc les conclusions ne s'appliquent pas aux climats chauds qu'aborde notre étude.
06	Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control	G.P. Henze, J.Pfafferott, S.Herkel, C.Felsmann	<p>L'article mène une étude sur la relation des modèles de confort avec la consommation d'énergie et le coût pour des bâtiments commerciaux, on en déduit que les modèles adaptatifs nous permettent une économie de la charge de refroidissement allant de 14 à 17%, cependant cela est valable pour les climats tempérés ou l'étude a été faite (Freiburg-Allemagne).</p> <p>Bien que l'article s'intéresse aux modèles de confort dans des immeubles de bureaux, cela reste restreint au cas allemand et donc à un climat tempéré et non pas chaud, néanmoins cet article démontre que les modèles adaptatifs sont efficaces dans des conditions climatiques normales et tempérées mais butent dans des périodes de canicule ou un système de refroidissement est nécessaire (Water-Driven Cooling Systems).</p> <p>Dans les climats maritimes tempérés, les modèles de confort permettent uniquement en été de diminuer les besoins en énergie dans les bâtiments naturellement ventilés mais on remarque une augmentation de la consommation pour les bâtiments avec un système de CVC centralisé, une fois de plus la limite de cet article et qu'il ne concerne pas les climats chauds.</p>
07	Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria	J.U.Pfafferott, S.Herkel, D.E.Kalz, A.Zeuschner	
08	Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones	J.Van Hoof, J.L.M.Hensen	

3. Conclusion générale

Le confort est une notion complexe, cela s'est traduit par différentes recherches durant plusieurs décennies qui ont abouti à définir le confort et à imaginer des modèles, créer des algorithmes sensés prédire et déterminer le confort intérieur des occupants en satisfaisant un nombre maximum d'entre eux. Deux grandes visions se complètent, se côtoient et parfois s'affrontent, une développée par Fanger se basant sur des expérimentations en laboratoire et considérant que l'homme est passif face à son environnement et que l'équilibre de ce dernier est basé sur le bilan thermique prenant en compte 6 paramètres (4 environnementaux et 2 personnels), la deuxième développée grâce à des études et constatations sur terrain qui au contraire défend l'idée que le confort thermique est plus qu'un bilan et qu'un équilibre de masse mais qu'il existe d'autres paramètres d'ordre socioculturels, comportementales ou encore d'acclimations qui aident et influencent chaque personne à trouver son propre équilibre car l'occupant est considéré comme actif et est dans la capacité à interagir et à contrôler son environnement immédiat.

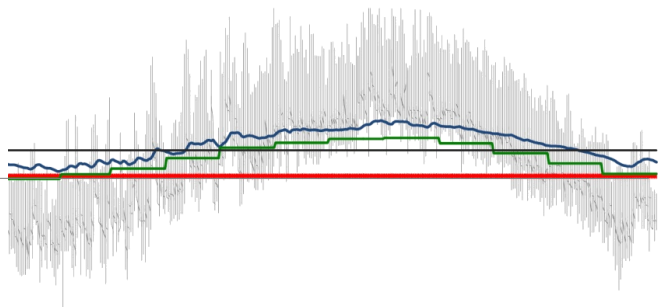
De ces approches découlent différentes normes qui ont chacune leur évaluation du confort et des températures intérieures acceptables, la norme ISO3370 qui se réfère au modèle de Fanger, la norme américaine ASHRAE55, européenne EN15251 et le modèle bioclimatique de Givoni se référant quant à eux au modèle adaptatif.

Néanmoins et malgré toutes ces études nombreuses et variées dans le domaine du confort et de sa corrélation avec la consommation et l'efficacité énergétique, elles se concentrent et comme il a été vu précédemment dans la section 2.2 du présent document principalement dans les climats tempérés et modérés et sont à peine explorés dans les climats chauds et arides ou dans les pays en voie de développement et rares d'entre elles abordent dans le même temps la consommation d'énergie en la mettant en parallèle avec les 4 modèles de confort. Le deuxième point à noter est que dans toute la littérature ou en tout cas en très grande majorité, les études portent sur une seule zone, une seule région, une seule ville ou un seul cas ce qui limite et réduit et exclut l'extrapolation avec d'autres villes ou régions induisant une incapacité à réaliser des études comparatives entre différentes zones climatiques qui nous paraissent très pertinent à envisager afin de dégager des similitudes ou au contraire d'éventuelles divergences.

C'est dans ce contexte scientifique que nous avons mis en œuvre notre travail de fin d'étude et notre expérimentation dans la partie suivante (partie 2) qui a pour but à l'aide d'une simulation thermique dynamique de mettre en parallèle à la fois les modèles de confort et la

consommation énergétique dans plusieurs zones climatiques considérées comme chaudes et arides et pourvoir choisir et identifier à la fin de notre mémoire le modèle le plus adéquat qui nous garantit à la fois un confort intérieur acceptable mais aussi nous permet une réduction des besoins en énergie grâce à une étude comparative.

METHODOLOGIE



III- Méthodologie

1. Introduction

Après cette étude bibliographique qui nous a permis de comprendre à la fois les différents modèles de confort, leurs divergences mais aussi leurs influences sur la consommation énergétique avec l'application des normes qui les incarnent, cela reste en grande partie théorique et incomplet et ne répond pas fondamentalement à notre problématique de départ exprimée en tout début du mémoire. Cependant, cela nous a nourris pour mener à bien la seconde partie du présent document qui est la partie expérimentale.

Le fond de notre démarche est d'analyser de façon plus approfondie l'impact des modèles de confort sur la consommation d'énergie pour les bâtiments de type bureaux et traiter cette question en se concentrant sur les climats chauds ou on trouve au final peu d'études sur ces zones, et nous permet à la fin de ce travail d'affirmer les lectures théoriques et les consolider ou au contraire de nuancer et rejeter ces thèses.

Notre étude est faite sur base de simulation thermique dynamique sur le logiciel DesignBuilder, qui nous donnera en modélisant notre bâtiment de référence et en encodant les multiples données d'entrées telles que les données météorologiques des zones sélectionnées pour l'étude, les températures de consigne pour chaque modèle testé, les demandes en énergie totale pour le refroidissement et le chauffage, les températures opératives et d'autres résultats essentiels à l'analyse des différents cas et à l'élaboration de conclusion qui répondront à notre problématique.

Ce chapitre expose tout d'abord le protocole expérimental général de la partie pratique puis une description du bâtiment de référence utilisé pour ce travail, sa modélisation sur le logiciel de simulation thermique DesignBuilding ainsi que le contexte sélectionné à travers les zones d'études représentées par différentes villes test.

2. Protocole expérimental général

L'approche se base sur une succession de plusieurs phases et étapes afin d'aboutir à des résultats fiables et des conclusions robustes, cela passe en premier lieu par la sélection d'un cas d'étude à savoir un bâtiment qui représentera un immeuble de bureau conventionnel sur lequel la simulation va être exercée. Le choix de villes représentatives du climat chaud va être effectué au nombre de 04 dans notre travail allant du climat méditerranéen au climat aride et désertique, le but est d'avoir le spectre le plus large possible de ce que peut contenir un climat classé comme chaud avec pour chaque région des spécificités et des caractéristiques différentes.

A partir de ces première étapes, une seconde phase va être entamée qui est celle de la modélisation sur le logiciel DesignBuilder et qui consistera à y introduire différentes données météorologiques pour les différentes villes, les températures de référence pour chaque modèle de confort ainsi que la matérialisation du bâtiment sélectionné en le modélisant en 3D et en encodant ses différentes caractéristiques.

La production des résultats se fera en dernière phase et cela en faisant varier les données climatiques caractérisant les 04 villes choisies ainsi que les modèles de confort en changeant les températures de consigne, le logiciel nous créera de multiples données sur la consommation énergétique pour le refroidissement et le chauffage ainsi que d'autres éléments qui constitueront la base de notre réflexion et analyse.

Le Schéma ci après (Figure13) résume de façon globale la structure et le déroulement du travail qui va être réalisé dans les parties suivantes du mémoire.

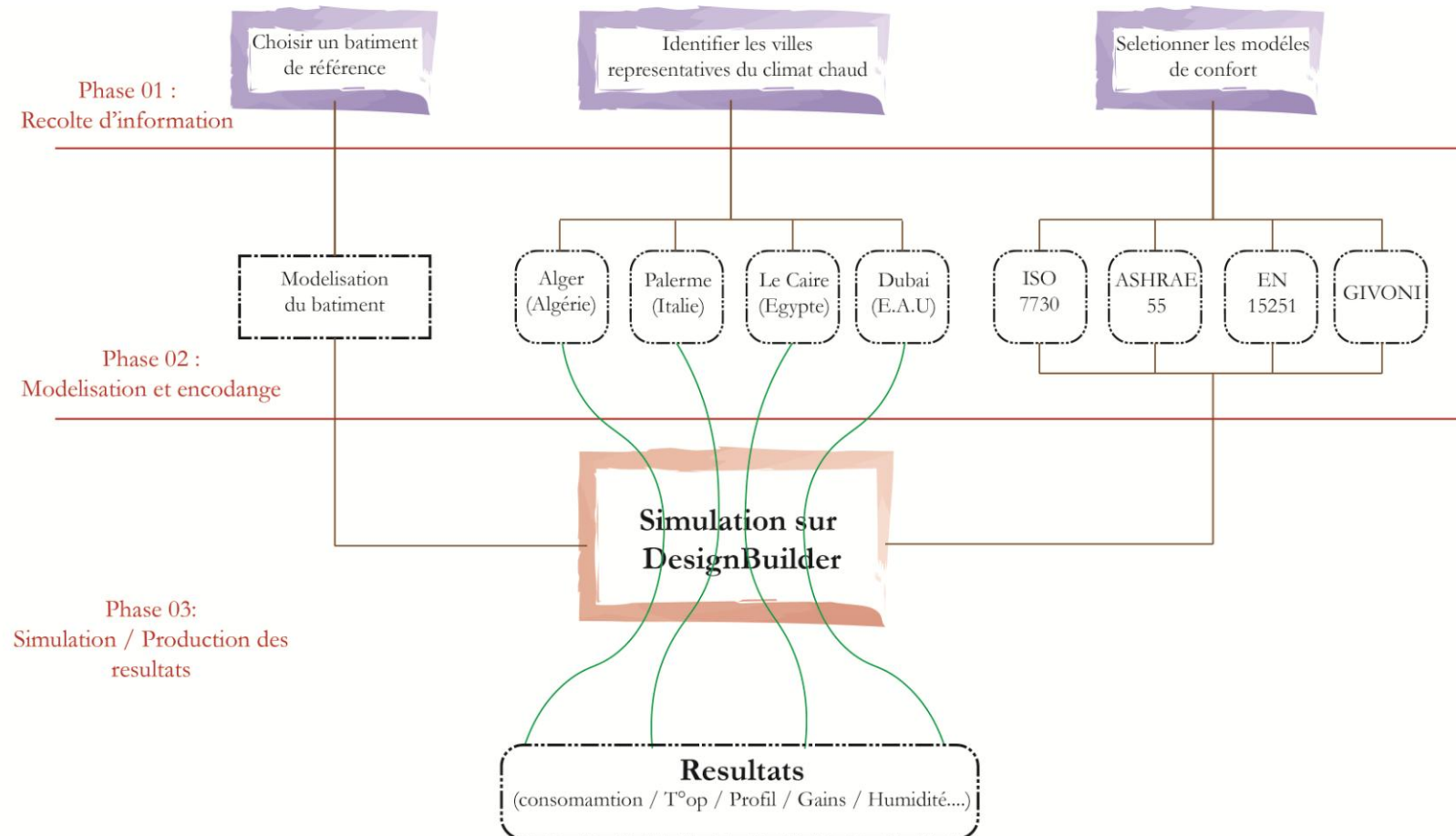


Figure 13 : Schéma explicatif du Protocole général de l'étude.

3. Etude de cas

3.1. Présentation du modèle

Le bâtiment de référence qui a été sélectionné pour notre étude est un bâtiment déjà proposé dans l'article de Gratia & al. (2004) intitulé « *How to use natural ventilation to cool narrow office buildings* » dans le cadre d'une étude de ventilation, cet exemple a été choisi à cause de sa taille moyenne et de sa simplicité car c'est un modèle représentant un immeuble classique conventionnel de bureaux. Cependant, quelques modifications ont été apportées en terme de composition de paroi, de résistance thermique, de ration entre plein et vitrage pour que d'une part on puisse l'adapter aux différents contextes choisis et d'autre part parce que l'exercice et le but des deux travaux, celui de Gratia & al. (2004) et celui qu'on va réaliser dans le cadre du mémoire ne sont pas les mêmes, pour le modèle original par exemple l'étanchéité du bâtiment est poussée à son maximum et est très élevée pour ne pas fausser les résultats, ce qui peut se comprendre pour une étude de ventilation qui a besoin d'un bâtiment bien isolé et très étanche à l'air, or pour notre cas cela n'est pas nécessaire et en plus ça ne sera pas réaliste en connaissant les méthodes constructives dans les pays choisis pour notre simulation.

En effet étant donné le choix des villes de test, on peut dire que les matériaux utilisés et les techniques de construction locales dans ces régions ne sont pas très rigoureuses comme par exemple dans les villes d'Alger, Le Caire ou encore Palerme ce qui induit une infiltration d'air plus importante et un bâtiment globalement moins étanche à l'air que celui utilisé dans l'étude conduite par Gratia & al. (2004).

Le modèle est un immeuble de bureaux parallélépipédique supposé représenter un bâtiment de taille moyenne composé de 150 locaux se développant sur 05 niveaux, chacun de ces niveaux comprend 30 modules de bureaux d'une superficie de 18.90 m² (5.40 m X 3.50 m) repartis sur les deux façades principales orientées nord et sud, séparés par un couloir central donnant de part et d'autre sur un espace de service où se place la circulation verticale.

Les différentes données géométriques concernant le bâtiment de référence sont illustrées dans la Figure 14.

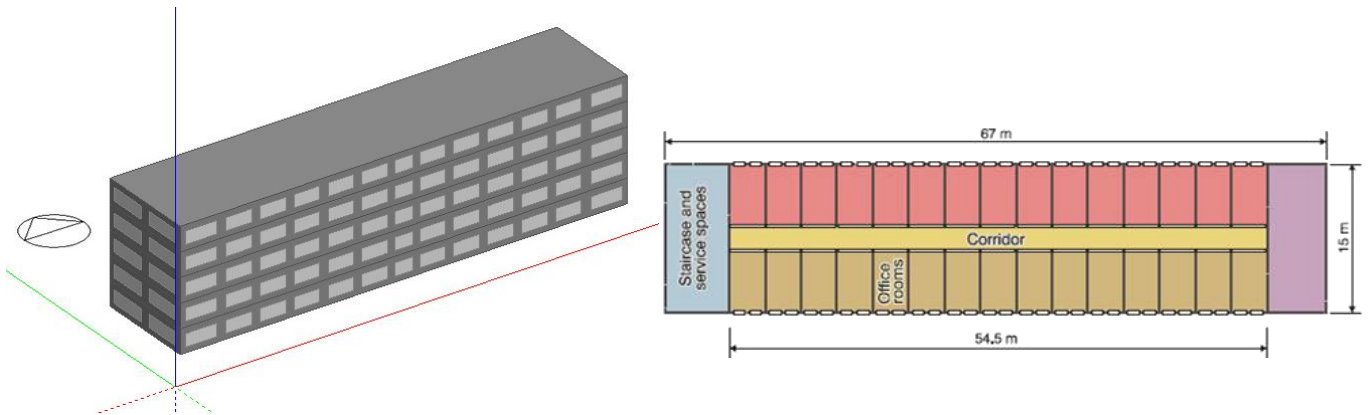


Figure 14 : 3D et caractéristiques géométriques du modèle (Gratia & al., 2004, p.1159).

3.2. La modélisation

L'encodage des différentes caractéristiques techniques du bâtiment de référence s'est faite sur le logiciel de simulation thermique DesignBuilder afin de pouvoir évaluer l'impact des différents modèles de confort sur la consommation énergétique de ce bâtiment de bureaux dans différents contextes. Les données techniques d'entrées ont été définies conformément et en accord avec la norme ASHRAE 90.1 2013 qui fixe suivant le type de bâtiment, son affectation et le contexte dans lequel il s'inscrit, les critères d'isolation, de ventilation, d'éclairage et toutes autres informations caractérisant l'enveloppe du bâtiment et ses divers équipements.

L'étape suivante était de déterminer en détail les différentes compositions de parois, le taux d'occupation, les apports internes et tous les éléments qui influenceront le comportement thermique du bâtiment et qui peuvent nous créer d'éventuelles erreurs dans nos calculs et fausser les résultats, cela a pu être réalisé et si on prend l'exemple de l'enveloppe du bâtiment qui est constituée des parois extérieures et de la toiture, en jouant sur le choix et les épaisseurs des matériaux utilisés afin d'atteindre la valeur du coefficient de transmission thermique « U » et par conséquent le critère de résistance thermique « R » fixé par la norme ASHRAE 90.1 2013.

Les parois extérieures sont d'une composition classique à savoir un élément constructif central en béton, une isolation thermique de type polystyrène expansé d'une épaisseur d'environ 4 cm et une finition intérieure et extérieure comme l'illustre la Figure 15 (b).

La toiture représentée dans la Figure 15 (a) est constituée quant à elle de plusieurs couches à savoir un béton coulé avec une chape de compression, d'un isolant d'une épaisseur d'environ 16 cm, une finition intérieure en plâtre et une étanchéité du coté extérieur composée d'une couche de bitume collée à chaud et une protection en gravier roulé, précisant que la toiture de notre bâtiment de référence est considérée comme plate et non accessible.

Notons que l'isolation est de faible épaisseur et peut paraître insuffisante si on la compare avec les pratiques et références européennes comme en Belgique par exemple, cela s'explique par le fait que cette épaisseur est suffisante pour atteindre les critères d'isolation recommandés par la norme ASHRAE 90.1 2013, mais aussi que le climat chaud et aride des régions du sud est différent de celui de l'europe continentale et occidentale plus modéré et froid, dans ces zones aux températures élevées comme les zones méditerranéennes représentées dans notre étude par les villes d'Alger et de Palerme ou encore les zones arides et désertiques représentées par les villes du Caire ou de Dubaï, l'isolation des bâtiments est une pratique peu répandue et quasi inexistante dans certains secteurs.

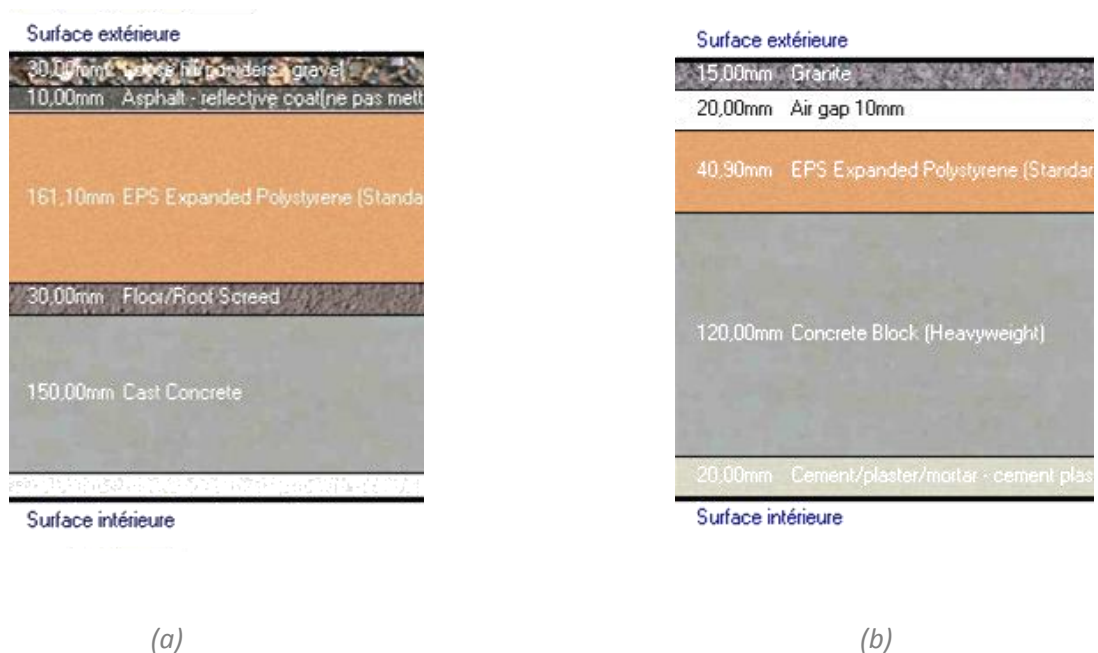


Figure 15 : Composition de la toiture (a) et des parois extérieures (b).

Le Tableau 09 résume les caractéristiques de base encodées dans le logiciel conformément à la norme ASHRAE 90.1 2013 afin d’avoir une vision globale de tous les éléments principaux pris en compte dans l’élaboration du modèle.

Tableau 9 : Caractéristiques du modèle de référence

Propriétés		Caractéristiques du modèle
01	Forme du plan	Rectangulaire
02	Orientation	Nord/sud (0°)
03	Dimension	67m*15m
04	Nombre de niveaux	05
05	Hauteur d’étage	3.60m
06	U. Rdc	$U = 0.54 \text{ W/m}^2\text{K}$
07	U Mur Ext	$U = 0.69 \text{ W/m}^2\text{K}$
08	U Toiture	$U = 0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$
09	U Fenêtres	$U = 1.98 \text{ W / m}^2\text{K}$
10	W.W.R	40 %
11	Occupation (densité)	0.1058 pers / m ² soit 02 personnes par bureau
12	Planning d’occupation	De 8:00 à 18:00 sauf W.E et Vacances
13	Gains internes	10W / m ² (équipements), 10.50W / m ² (éclairage à 300 lux)
14	Taux d’humidité	40%<HR<60%
15	Système de chauffage	Gaz à condensation
16	Système de climatisation	CAV, Air Coller Chiller/COP 3.5
17	Système de ventilation	Mécanique actif
18	Resistance à l’habillement	0.7clo en été/1clo en hiver
19	Activité métabolique	Sédentaire de bureau 1met
20	Vitesse de l’air	0.1m/s
21	Consigne limite de Températures	10°C pour le Chauffage /28°C pour la climatisation

La phase de traitement de données introduites dans le logiciel DesignBuilder inclus : la simulation de notre modèle et l'analyse thermique de ce dernier en ayant pour résultat la consommation d'énergie mensuelle pour le chauffage et le refroidissement, les températures opératives sur l'année et la variation du taux d'humidité pour chaque modèle de confort et dans chaque zone sélectionnée.

4. Choix du contexte

Après la modélisation de notre bâtiment représentant un immeuble de bureaux sur le logiciel DesignBuilder et après avoir introduit toutes les données caractéristiques du modèle et celle en relation avec son utilisation et avec l'activité des ses occupants, on se penche sur le choix des zones où la simulation sera effectuée.

Notre parti pris dans cette étude était dès le départ de se focaliser sur les régions dites chaudes car dans la littérature et comme vu dans la première partie (section II.2) les études sont peu nombreuses concernant ce type de climat, notre souhait était aussi et afin de pouvoir faire une étude comparative plus approfondie de sélectionner plusieurs villes qui s'inscrivent dans ce type de climat néanmoins avec des caractéristiques différentes pour toucher des régions plus larges du globe et avoir au final une plus grande crédibilité et une plus grande robustesse dans nos interprétations et dans nos analyses.

4.1. Classification climatique

Afin de pouvoir faire un choix et identifier les villes représentatives du climat chaud, nous nous sommes basés tout d'abord sur les classifications internationales qui sont reconnues et utilisées dans les différentes études et dans les différents domaines. Pour cela nous avons fait plusieurs recherches ce qui nous a permis de constater qu'il existait plusieurs chercheurs et scientifiques qui se sont penchés sur ce sujet et que diverses classifications existaient, qui pouvaient paradoxalement être différentes alors que le sujet de ces travaux était le même à savoir le climat du globe terrestre de façon générale, cela était dû en réalité aux éléments sur lesquels se basaient chacun de ces scientifiques et ce qu'ils prenaient en compte afin de réaliser leurs classifications.

Les classifications sont basées sur deux critères principaux à savoir les précipitations et les températures sur l'année, cependant les premières cartes étaient étudiées avec des moyennes annuelles de température et de précipitation ce qui donnait des résultats assez surprenants comme dans les cartes de Knoch & Schulze cités par Bagnouls & Gaussen (1957)

ou la capitale française lui est attribué les mêmes caractéristiques climatiques que la capitale russe ce qui a été très critiqué car en prenant en compte que les quantités et les chiffres annuels, on met de côté ce qui est le plus important à savoir l'interaction entre ces deux phénomènes et leur répartition tout au long de l'année.

Gaussen (1955) botaniste et biogéographe toulousain a à son tour proposé une classification basée cette fois ci sur le « rythme » des températures et des précipitations durant l'année et donc sur des valeurs qui varient suivant les différents mois, la succession et l'intensité de périodes de froid et de chaleur, ce qui est plus réaliste et qui a donné naissance à 12 grandes régions climatiques, chacune d'elles subdivisées en sous régions avec ses propres caractéristiques de température et de pluviométrie.

D'autres classifications comme celle de Koppen et d'ASHRAE sont au jour d'aujourd'hui plus fréquemment utilisées et admises par la communauté scientifique et sont considérées comme étant les plus précises et qui traduisent au mieux la réalité, c'est ces deux classifications qu'on a pris comme référence dans notre travail pour identifier les villes à climat chaud.

La classification de Koppen a été inventée en 1900 par le botaniste Wladimir Peter Koppen inspiré d'une part par la division du climat de Candolle en 5 zones et d'autre part par la carte de la végétation mondiale élaborée par Grisebach en 1866 (Peel & al., 2007) et est utilisée comme base pour identifier les différents climats mondiaux, elle a été plusieurs fois actualisée par ses successeurs en se basant sur l'observation réelle des milliers de données de station météorologiques à travers le globe et l'interpolation entre station plutôt que la subjectivité. Cela se traduit par une carte mondiale divisée en 30 climats différents constitués de 03 régions tropicales, 09 à climat tempéré, 02 polaire, 04 considérés comme arides et 12 régions classées comme froides comme le démontre la Figure 16.

World map of Köppen-Geiger climate classification

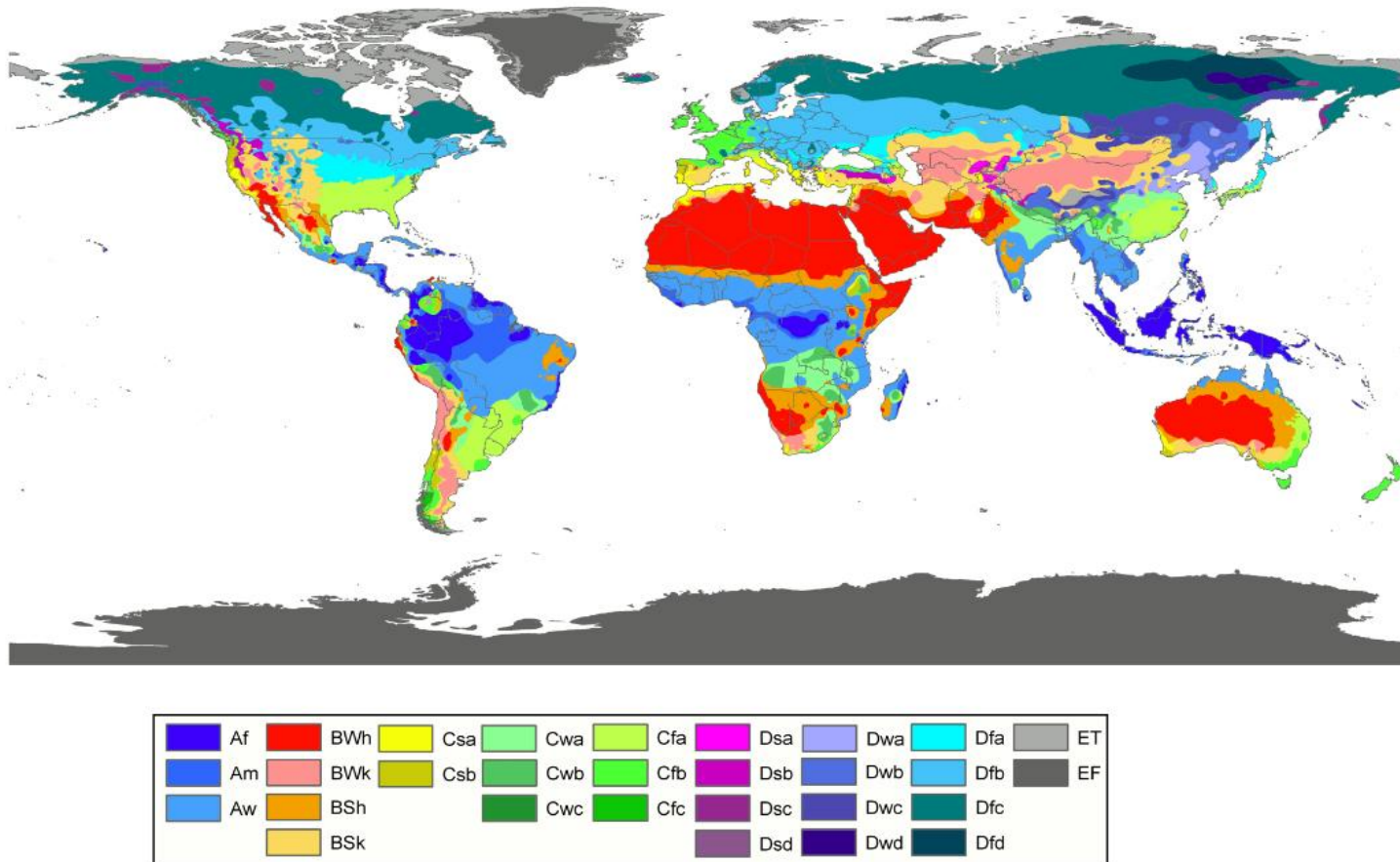


Figure 16 : Classification climatique de Koppen- Geiger (Peel & al., 2007, p.1642).

La classification se fait en fonction de la pluviométrie et des températures mensuelles durant l'année, les zones sont dénommées par une succession de symboles et plus précisément de lettres (au nombre de trois), chacune d'entre elles représente un élément en relation avec la météorologie, la première définit le type de climat, la seconde le régime pluviométrique et la dernière est en relation avec les températures et détermine plus particulièrement la variation de température. Le Tableau 10 résume ces différentes lettres et leur définition.

Si on prend l'exemple de la Belgique, on voit suivant la carte qu'elle est définie comme Cfb ce qui revient à dire que le climat est un climat tempéré humide avec des précipitations toute l'année, et a été humide avec une température moyenne mensuelle T_m du mois le plus chaud $< 22^\circ\text{C}$.

1st	2nd	3rd	Description	Criteria*
A			Tropical	$T_{\text{cold}} \geq 18$
	f		- Rainforest	$P_{\text{dry}} \geq 60$
	m		- Monsoon	Not (Af) & $P_{\text{dry}} \geq 100 - \text{MAP}/25$
	w		- Savannah	Not (Af) & $P_{\text{dry}} < 100 - \text{MAP}/25$
B			Arid	$\text{MAP} < 10 \times P_{\text{threshold}}$
	W		- Desert	$\text{MAP} < 5 \times P_{\text{threshold}}$
	S		- Steppe	$\text{MAP} \geq 5 \times P_{\text{threshold}}$
		h	- Hot	$\text{MAT} \geq 18$
		k	- Cold	$\text{MAT} < 18$
C			Temperate	$T_{\text{hot}} > 10$ & $0 < T_{\text{cold}} < 18$
	s		- Dry Summer	$P_{\text{sdry}} < 40$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$
	w		- Dry Winter	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
	f		- Without dry season	Not (Cs) or (Cw)
		a	- Hot Summer	$T_{\text{hot}} \geq 22$
		b	- Warm Summer	Not (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$
		c	- Cold Summer	Not (a or b) & $1 \leq T_{\text{mon10}} < 4$
			Cold	$T_{\text{hot}} > 10$ & $T_{\text{cold}} \leq 0$
D	s		- Dry Summer	$P_{\text{sdry}} < 40$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$
	w		- Dry Winter	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
	f		- Without dry season	Not (Ds) or (Dw)
		a	- Hot Summer	$T_{\text{hot}} \geq 22$
		b	- Warm Summer	Not (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$
		c	- Cold Summer	Not (a, b or d)
		d	- Very Cold Winter	Not (a or b) & $T_{\text{cold}} < -38$
			Cold	$T_{\text{hot}} > 10$ & $T_{\text{cold}} \leq 0$
E			Polar	$T_{\text{hot}} < 10$
	T		- Tundra	$T_{\text{hot}} > 0$
	F		- Frost	$T_{\text{hot}} \leq 0$

*MAP = mean annual precipitation, MAT = mean annual temperature, T_{hot} = temperature of the hottest month, T_{cold} = temperature of the coldest month, T_{mon10} = number of months where the temperature is above 10, P_{dry} = precipitation of the driest month, P_{sdry} = precipitation of the driest month in summer, P_{wdry} = precipitation of the driest month in winter, P_{swet} = precipitation of the wettest month in summer, P_{wwet} = precipitation of the wettest month in winter, $P_{\text{threshold}}$ = varies according to the following rules (if 70% of MAP occurs in winter then $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT}$, if 70% of MAP occurs in summer then $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT} + 28$, otherwise $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT} + 14$). Summer (winter) is defined as the warmer (cooler) six month period of ONDJFM and AMJJAS.

Tableau 10 : Description des lettres définissant les différents climats (Peel & al., 2007, p.1636).

Avec ces critères et sur base de cette classification de Koppen mais aussi celle d'ASHRAE qui classifie elle aussi les climats en zones et prend des lettres et des chiffres comme symbole pour les définir, on a pu choisir nos 04 villes test qui représenteront les régions où notre immeuble de bureaux sera situé et pouvoir au final introduire les différentes données météorologiques pour réaliser notre simulation. Notre choix s'est porté sur 02 villes à climat chaud, aride et désertique qui sont la ville du Caire en Egypte et la ville de Dubaï aux Emirats Arabes Unis, les 02 autres villes, Alger en Algérie et Palerme en Italie sont classées elles aussi comme chaudes mais avec des caractéristiques différentes vu qu'elles sont des villes à climat méditerranéen (à été chaud et sec).

Ces différences de caractéristiques entre les 04 villes nous paraissent essentielles dans notre travail pour toucher plusieurs sous climats liés au climat chaud et être apte à faire une analyse réelle et complète avec les différentes facettes que peut avoir cet environnement pour ne pas tomber dans la caricature et généraliser les interprétations qu'on pourrait extraire des résultats d'un seul sous ensemble alors qu'il existe dans la réalité des caractéristiques différentes pour un même climat, on va être ainsi plus nuancé, plus précis et donc plus pertinent dans notre étude ce qui lui donnera une plus grande valeur.

Notons que tous les fichiers climatiques utilisés pour notre simulation thermique dans le logiciel DesignBuilder sont extraits du logiciel de donnée météorologique Meteonorm7 qui nous fournit les températures, l'irradiation, les précipitations et d'autres données météorologiques et climatiques qui sont essentielles pour pouvoir réaliser notre simulation et mener à bien notre travail.

4.2. Sélection des villes de test

Comme mentionné précédemment, les villes qui ont été choisies pour représenter le climat chaud sont celles d'Alger, Le Caire, Palerme et Dubaï et cela à cause de leurs spécificités et leurs caractéristiques qui sont différentes mais qui s'associent toutes à un climat considéré comme chaud par les classifications à la fois de Koppen et d'ASHRAE.

Nous allons à présent les situer géographiquement, les classer plus précisément et présenter leurs divers aspects en fonction des caractéristiques météorologiques.

a) Le Caire (Egypte)

La ville du Caire (Figure 17) est située au nord-est du continent africain, elle est la capitale de l’Egypte, et est considérée comme l’une des plus grande mégalozone dans le monde et la plus importante au moyen orient en terme de population qui s’élève à 9.610.002¹⁴ habitants à ce jour rien que pour le centre de la ville, cela dépasse les 20 millions d’habitants si on prend en compte toute l’agglomération ou toute la province cairote, on y trouve une grande diversité et une grande richesse architecturale et culturelle



Figure 17 : Situation géographique du Caire.

notamment avec plusieurs monuments classés au patrimoine mondial de l’humanité comme le quartier islamique ou encore les vestiges de l’Egypte ancienne, elle est l’une des principaux points de recherche et de sciences islamiques notamment avec la présence de la mosquée et université Al-Azhar considérée parmi les plus anciennes au monde. La ville se situe en amont du détroit du Nil, fleuve qui la traverse et est considérée comme une ville à climat chaud, le Tableau 11 résume ses coordonnées géographiques.

Tableau 11 : Données géographiques et démographiques de la ville du Caire.

Le Caire		
Région : Le Caire	Pays : Egypte	
Latitude : 30.13° N	Longitude : 31.40° E	Altitude : 74.06m
Population : 20.439.541 hab		

Le Caire est classé en zone 02 «2B» selon la classification d’ASHRAE et dans le groupe «B» et plus précisément BWh selon la classification de Koppen, le climat est considéré comme étant sec, aride et désertique ou la température moyenne annuelle est supérieure à 18°C.

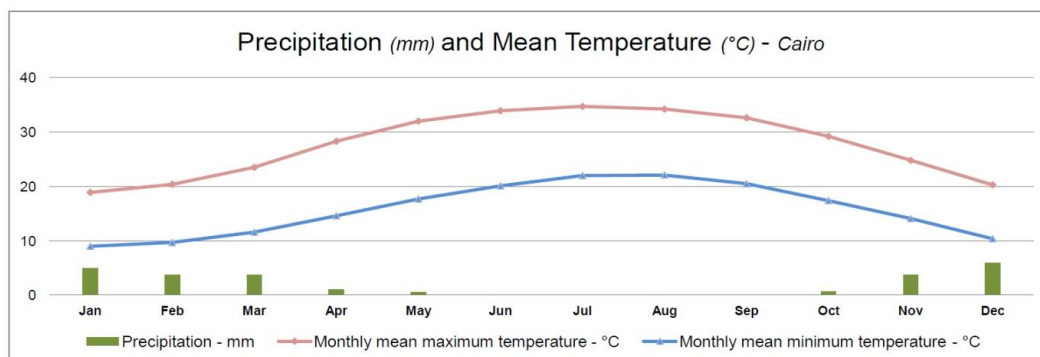


Figure 18 : Distribution des moyennes¹⁵ de températures et de précipitations pour le Caire.

¹⁴ Central agency for public mobilization and statistics (CAPMAS), <http://www.capmas.gov.eg/HomePage.aspx>, consulté le 02/01/2017.

¹⁵ World Meteorological organization, <http://worldweather.wmo.int/fr/home.html>, consulté le 21/10/2016

b) Palerme (Italie)

La ville de Palerme est l'une des principales villes du sud italien, elle est le chef lieu de la région de Sicile (Figure 19), île au sud ouest de l'Italie en pleine mer méditerranée, ville côtière, elle s'implante du côté nord de l'île et jouit d'un climat méditerranéen.

Avec sa position géographique en trait d'union entre l'Afrique et l'Europe et ouverte sur la mer méditerranée, elle était durant des siècles une ville de grande importance ou furent stationnés notamment les légionnaires romains, les civilisations grecques et romaines qui lui ont offert une richesse architecturale et une multitude de monuments et d'œuvres singulières. Elle compte 657.561¹⁶ habitants intramuros et atteint 1.243.565¹⁶ habitants si on prend toute la banlieue et les entités affiliées administrativement à la ville de Palerme. Le Tableau 12 nous donne les différentes informations sur la géo localisation de la ville.



Figure 19 : Situation géographique de Palerme.

Tableau 12 : Données géographiques et démographiques de la ville de Palerme.

Palerme		
Région : Sicile	Pays : Italie	
Latitude : 38.18° N	Longitude : 13.10° E	Altitude : 21.03 m
Population : 1.243.565 hab		

La ville est classée en zone 03 dans la classification d'ASHRAE et dans le groupe «C» suivant la classification de Koppen (Csa), le climat est considéré comme méditerranéen tempéré, humide en hiver où les quantités moyennes de pluie peuvent dépasser les 120 mm dans certains mois comme sur la Figure 20, sec et chaud en été, avec des températures moyennes du mois le plus chaud supérieure à 22°C.

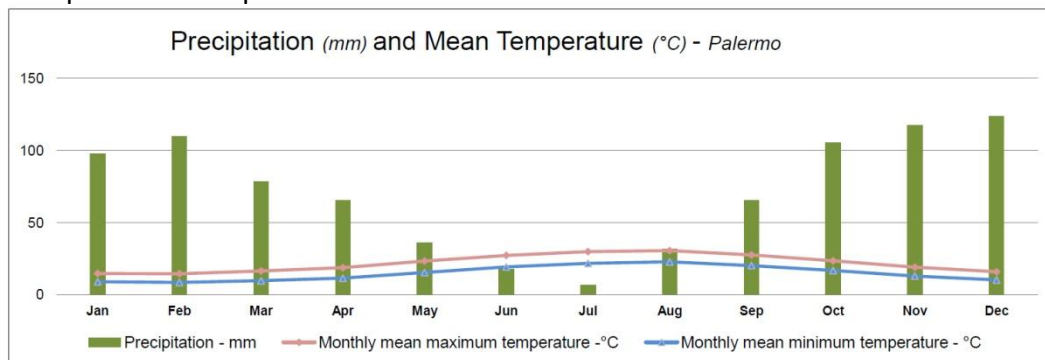


Figure 20 : Distribution des moyennes¹⁵ de températures et de précipitations pour Palerme.

¹⁶ Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?lang=en#>, consulté le 02/01/2017.

c) Alger (Algérie)

De part sa superficie de 2.381.741 Km², sa situation géographique (Tableau 13) aux portes de l'Afrique et de l'Europe et avec le littoral le plus important de Méditerranée, l'Algérie (Figure 21) s'est imposée comme le plus grand pays d'Afrique et l'un des plus importants dans la région, sa capitale Alger dénommée «*Alger la blanche*» à cause de la blancheur de ses bâtiments, ouverte sur la mer est la plus grande ville du pays avec 2.988.145¹⁷ habitants au recensement de 2008 dont 98.329 rien que dans le chef lieu de la ville.



Figure 21 : Situation géographique d'Alger.

ALGER		
Région : Alger	Pays : Algérie	
Latitude : 36.68° N	Longitude : 3.22° E	Altitude : 28.95 m
Population : 2.988.145 hab		

Tableau 13 : Données géographiques et démographiques de la ville d'Alger.

Elle fut partie du royaume de Numidie et a été fondée par les phéniciens aux 4 siècles av J.C, de part son importance elle a vu se succéder durant des siècles différentes civilisations et populations des phéniciens, romains, espagnoles, ottomans, et français ce qui lui a conféré une diversité et un multiculturalisme que peu de grandes villes possèdent, cela se voit à travers la ville où les styles architecturaux se côtoient notamment le style haussmannien bien présent dans la ville. Elle est classée en zone 03 dans la classification d'ASHRAE et dans le groupe «C» suivant la classification de Koppen (Csa), le climat est considéré comme méditerranéen tempéré, humide en hiver, sec et chaud en été, avec des températures moyennes du mois le plus chaud supérieure à 22°C. (Figure 22)

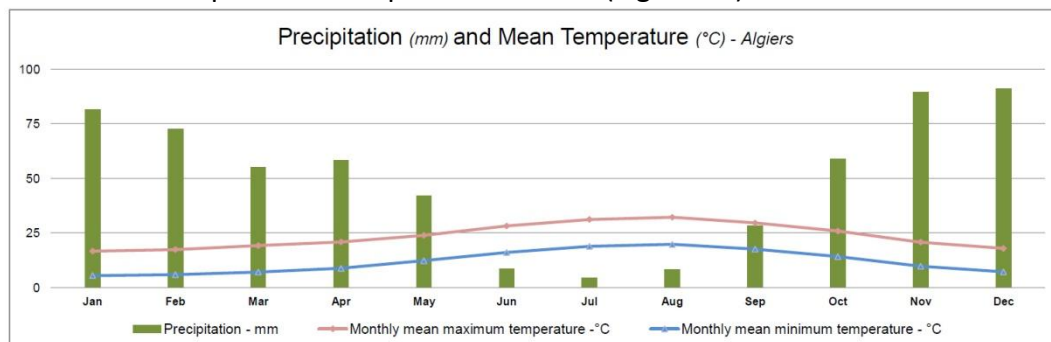


Figure 22 : Distribution des moyennes¹⁵ de températures et de précipitations pour Alger.

¹⁷ Office National des Statistiques (ONS), http://www.ons.dz/IMG/pdf/pop3_national.pdf, consulté le 02/01/2017.

c) Dubaï (Emirats Arabes Unis)

Capitale de l'émirat de Dubaï et première ville des E.A.U devant la capitale Abu Dabi, Dubaï est devenue connue à travers le monde pour son tourisme, ses infrastructures hôtelières comprenant le seul hôtel 7 étoiles au monde (Burj-Al-Arab) et ses projets architecturaux démesurés et largement médiatisés telles que les différentes îles artificielles ou encore la Bourj Khalifa qui est à l'heure actuelle la tour la plus haute du monde culminant à 829m.



Figure 23 : Situation géographique de Dubaï.

Elle se situe au moyen orient et donne sur le golf persique comme illustré sur la Figure 23, fondée en plein désert elle hérite d'un climat chaud aride et désertique classée dans le groupe «B» selon Koppen BWh ou la température moyenne annuelle est supérieure à 18°C et en zone 01 suivant la classification d'ASHRAE. La Figure 24 représente la distribution des températures mensuelles ainsi que les précipitations. Sa population était de 1.321.453¹⁸ en 2005 mais la particularité est qu'il y réside beaucoup plus de personnes étrangères que de citoyens Emiratis, ils étaient seulement 137.573¹⁸ citoyens contre 1.183.880¹⁸ d'étrangers durant la même période, en 2010 cela est passé à 168.029 citoyens alors que les étrangers ont dépassé les 2 millions de résidents dans la ville.

Tableau 14 : Données géographiques et démographiques de la ville de Dubaï.

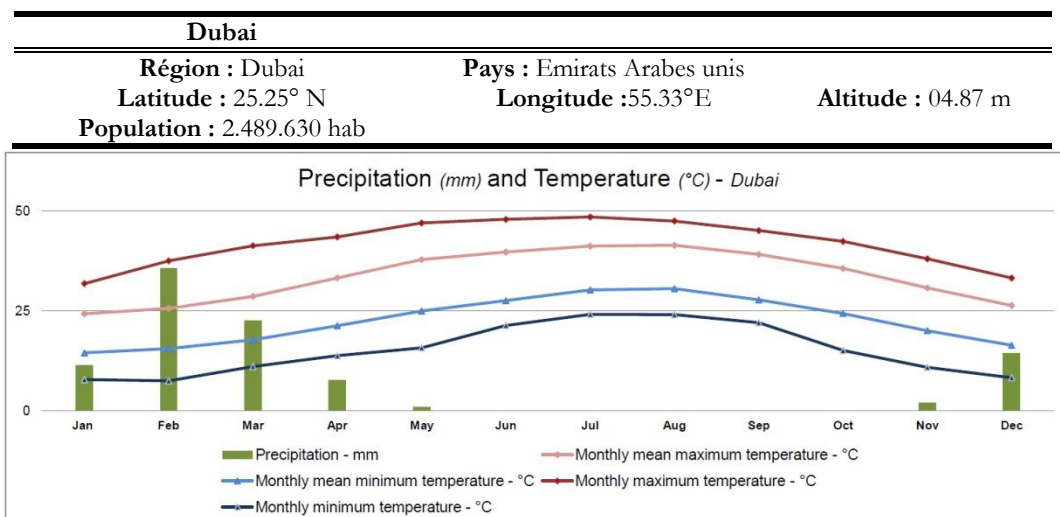


Figure 24 : Distribution des températures¹⁹ et des précipitations pour Dubaï.

¹⁸ Federal competitiveness and Statistics authority,

<http://original.fcsa.gov.ae/StaticBySubjectAR/tabid/129/Default.aspx?MenuId=1>, consulté le 02/01/2017.

¹⁹ Ministry of presidential affairs - National center of meteorology and seismology,

<http://www.ncms.ae/en/climate-reports-yearly.html?id=8803>, consulté le 21/10/2016

5. Conclusion

On a pu voir dans cette partie les différentes étapes qu'on a réalisées afin d'arriver à produire des résultats qui seront exposés dans la partie qui suit, la rigueur et la méthodologie sont primordiales dans cette étape afin d'atteindre des résultats cohérents et fiables, le choix des zones d'études n'a pas été fait au hasard ni celui des éléments en relation avec le bâtiment, on pense aux caractéristiques techniques qu'on a pu déterminer et encoder pour réaliser le modèle dans le logiciel DesignBuilder.

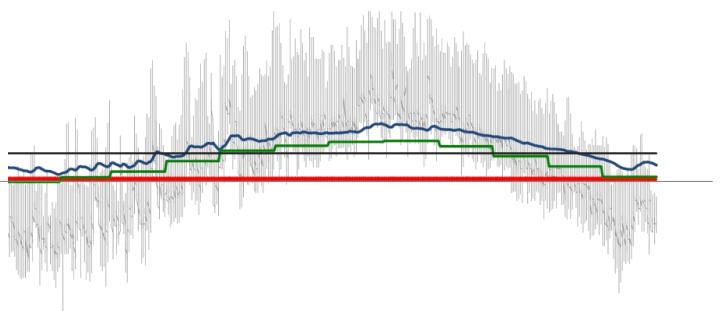
Comme dans toute étude, il existe bien entendu des incertitudes et des limitations que ce soit du au logiciel qui a comme tout programme informatique ses seuils de possibilités ou bien d'un point de vue des données qu'on a pu récolter et introduire dans la réalisation de la simulation, la définition des parois et de la toiture par exemple, leurs compositions et leurs niveaux d'isolation étaient déterminés en accord avec les critères fixés par la norme ASHRAE 90.1 2013 et en fonction de ce qui peut se faire dans ces pays, la toiture a été définie comme plate et non pas inclinée car dans la majorité du parc immobilier algérien ou dans les autres pays choisis les toitures inclinées sont peu utilisées, la brique rouge en façade bien présente en Belgique n'est pas le matériau d'usage dans ces zones c'est pour cela qu'elle n'a pas été sélectionnée pour notre bâtiment...ect. Cependant, d'autres éléments comme par exemple le taux d'infiltration dans notre bâtiment a été choisi par défaut car il nous paraissait improbable de reprendre celui de l'étude d'où notre modèle a été tiré à savoir l'étude de Gratia & al. (2004) car il était très bas et très faible et le bâtiment très étanche à l'air (0.226 ach), ce qui est concrètement irréaliste dans ces pays et dans le même temps, on n'a pas pu trouver dans la littérature des bâtiments similaires implantés dans les mêmes régions que les nôtres pour en extraire un taux d'infiltration.

Les limitations sont quant à elles beaucoup plus liées au logiciel, en effet dans un bâtiment de bureau où se côtoient plusieurs personnes en même temps, il est rare qu'elles restent figées devant leurs bureaux toute la journée de 8h à 18h, il existe bien une interaction entre les personnes, des absences ou on a dans ce cas moins d'apports internes que ce qui a été encodé ou au contraire, des réunions et des regroupements dans certains bureaux, dans ce cas les apports internes seront bien plus importants que ce qu'on a pu définir, ces dynamiques ne sont pas quantifiables et en plus le logiciel prend en compte qu'une valeur absolue sans possibilité d'évolution dans le temps. Autre exemple est celui de la circulation d'air, on sait très bien que de part la disposition des bureaux, il peut y avoir des disparités dans le gradient des températures et cela a été prouvé dans plusieurs études, du principalement à leur orientation, les bureaux au nord ont des températures plus basses

que ceux exposés plein sud ou les apports solaires sont plus importants faisant augmenter les températures, dans ce contexte l'ouverture des portes des bureaux ou leur fermeture fait varier les températures dans les locaux à cause de la circulation de l'air qui peut y avoir entre eux, cela n'est aussi pas possible de prédire ou d'encoder dans notre logiciel.

Toutes ces limitations et incertitudes énumérées dans le paragraphe précédent peuvent altérer nos résultats et peuvent agir sur notre simulation, ce qui n'est pas à négliger, néanmoins même si elles sont présentes cela n'altérera pas dans notre cas nos conclusions ni nos analyses et encore moins notre travail car d'une part ces incertitudes et ces limitations sont appliquées à toutes les simulations et par conséquent à tous les modèles de confort et pour toutes les villes de test et d'autre part notre travail est basé essentiellement sur une étude comparative entre ces derniers ce qui gomme ces incertitudes et les estampe d'où la robustesse et la fiabilité de notre étude.

Résultats



IV- Résultats

1. Introduction

Dans cette première partie post-simulation, nous allons essayer avant d’avoir une analyse approfondie et d’éventuelles réponses à nos questions et à nos interrogations pour au final pouvoir répondre à notre problématique, d’exposer les différents résultats des différentes simulations qu’on a pu effectuer sur le logiciel DesignBuilder concernant les températures de confort intérieure obtenues mais aussi sur la consommation en énergie. Le but de cette partie n’est pas d’essayer de comprendre ce qui a été généré par le logiciel mais seulement les présenter et essayer de les regrouper en catégories et en extraire les schémas ou les graphiques les plus pertinents et intéressants à approfondir dans la partie analyse de ce mémoire.

Rappelons que tous les résultats obtenus sont une combinaison entre d’une part les différents modèles de confort à savoir celui du modèle analytique représenté par la norme ISO7730 ou le modèle adaptatif représenté par norme américaine ASHRAE55, européenne EN15251 ou bioclimatique de Givoni et d’autre part les données climatiques représentant les différentes villes à climat chaud et régions sélectionnées pour l’étude, ou notre bâtiment de référence est implanté, ce qui revient à dire que notre bâtiment de bureaux garde ses même caractéristiques géométriques et techniques dans tous les cas simulés, les modifications sont principalement apportées à chaque fois aux deux variantes de base ,les fichiers climatiques et les températures de consignes qui représentent les seuils de nos modèles de confort.

2. Distribution des températures

Parmi les quantités d’éléments qui ont été produits dans notre travail, les températures intérieures obtenues avec l’application des seuils des modèles de confort dans chaque ville sont les plus intéressantes à regarder en premier car le confort intérieur passe principalement par les températures opératives que peut fournir l’adoption de chaque modèle à notre bâtiment, c’est ces températures qui offrent essentiellement aux occupants

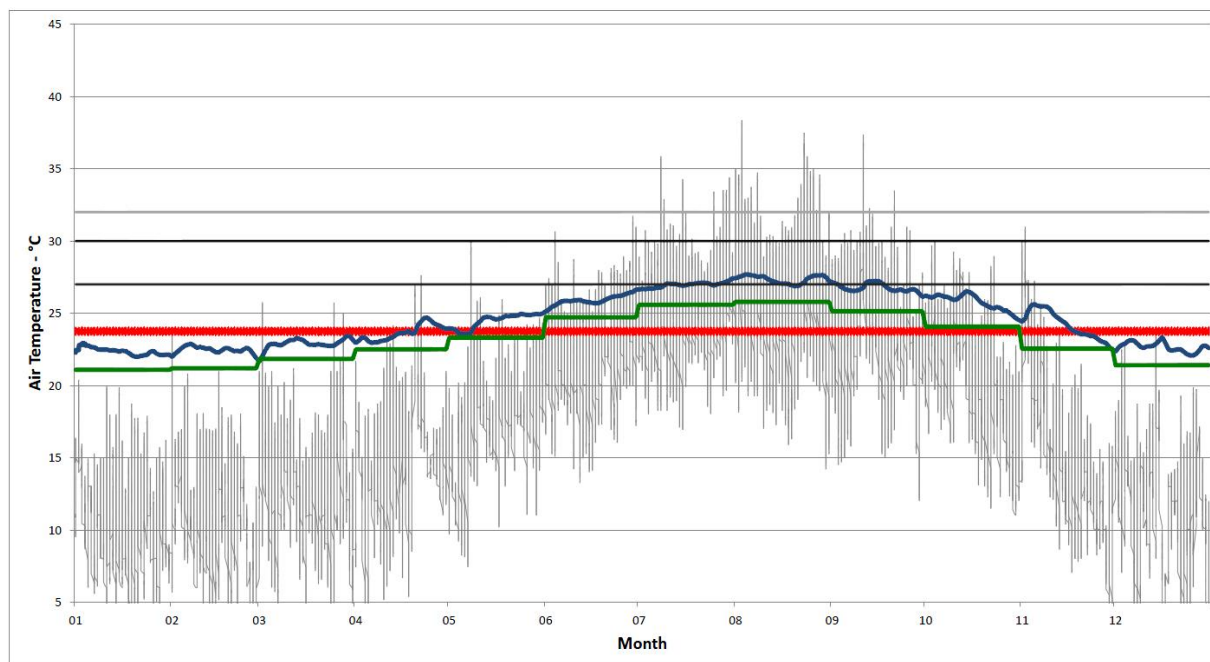
soit une sensation de confort et de bien être ou au contraire vont être considérées comme froide ou chaude et dans ce cas seront la cause d'un inconfort.

Afin que les résultats ne restent pas abstraits, représentant qu'une liste de chiffres sans aucun intérêt et pour qu'ils soient au contraire pertinents et compréhensibles, nous avons dans un second temps traiter ces données et traduit les températures de confort en graphiques qui représentent leur distribution et leur évolution durant l'année, ils sont mis en parallèle avec le spectre des températures extérieures pour chacune des villes testées, la ville d'Alger, du Caire, de Palerme et celle de Dubaï.

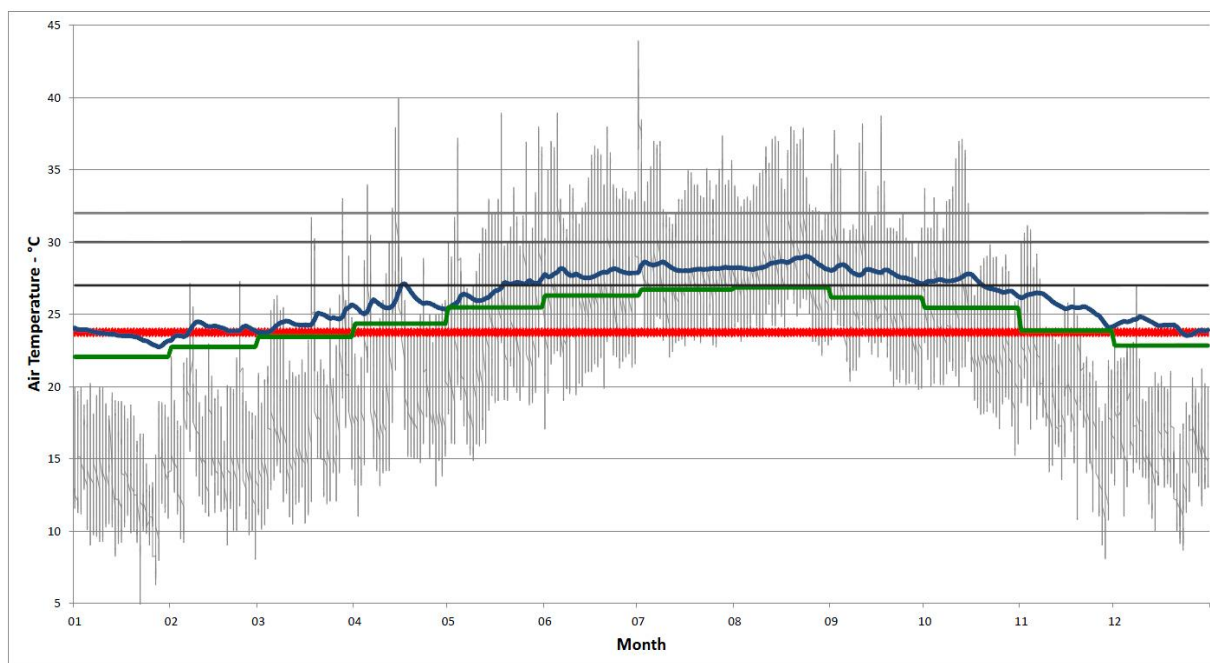
Notre but est d'avoir une interaction entre les deux températures, celle du climat extérieur et celle représentant les différents modèles de confort et pouvoir par cette visualisation identifier les concordances entre les profils (T° extérieure et T° intérieure) ou au contraire leurs divergences et leurs différences, cela nous permettra d'anticiper les moments de l'année ou il est probable d'avoir une consommation énergétique pour refroidir ou au contraire chauffer le bâtiment car le développement des profils dans ces périodes sont différents et distincts ce qui implique des besoins énergétiques afin de les équilibrer et atteindre les températures de confort, ou au contraire quand la consommation peut être moins importante et cela lorsque les profils évoluent de la même façon et dans un même intervalle de températures que ce soit ceux des températures extérieures ou ceux du confort.

Au final ces profils nous donnent à titre indicatif bien-sur une idée préalable en suivant l'interaction entre les différentes courbes, l'évolution dans le temps de la consommation d'énergie, cela reste bien entendu subjectif et à confirmer en les étudiant plus en profondeur et en analysant aussi les besoins réels produits par les autres simulations car la consommation en énergie n'est pas affectée seulement par les températures mais aussi prend en compte d'autres éléments et paramètres complexes et variés.

Notons et précisons que ces graphiques représentant les 04 villes illustrées ci-après dans la Figure 25 ne sont pas des illustrations de la consommation d'énergie et seule la distribution des températures est prise en compte dans leur construction.

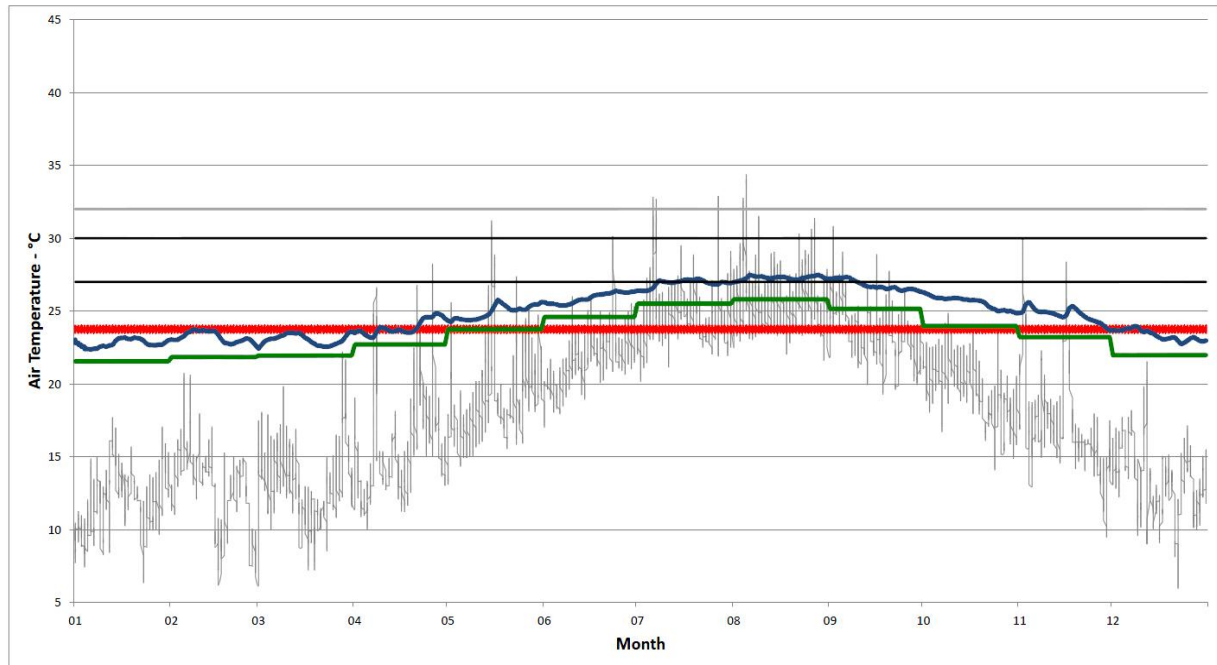


a) Alger

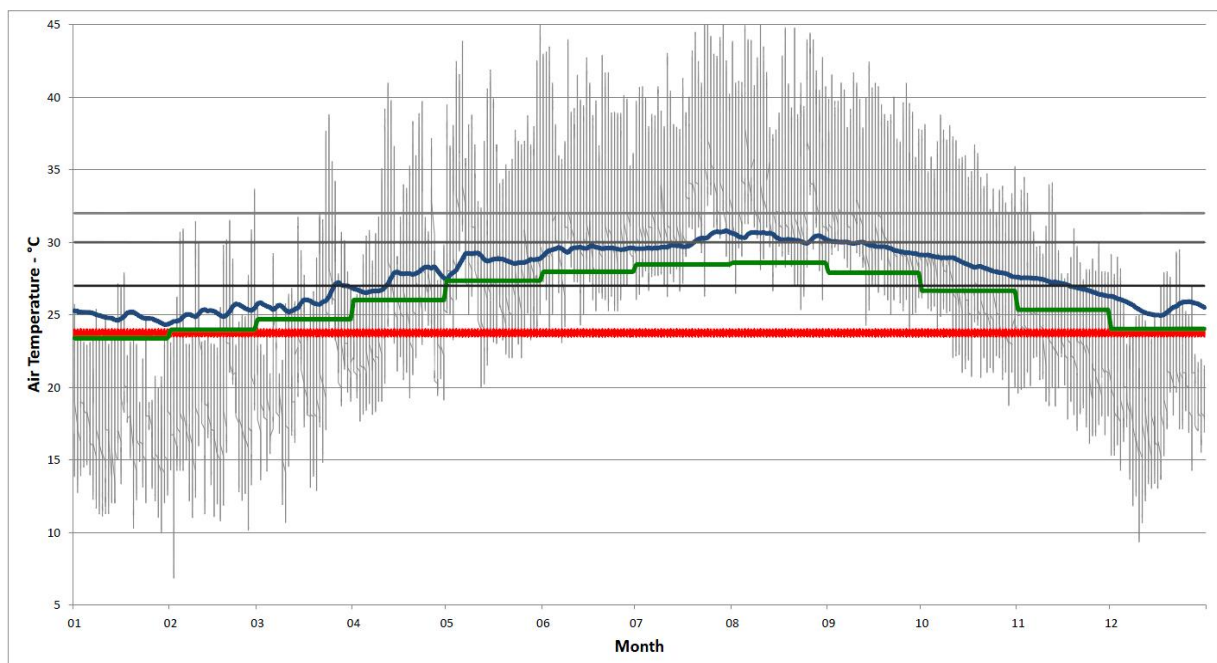


b) Le Caire

Modèle analytique de Fanger – ISO7730	—	—	Modèle adaptatif européen – EN15251
Modèle adaptatif américain – ASHRAE 55	—	—	Modèle bioclimatique de Givoni



c) Palermo



d) Dubaï

Modèle analytique de Fanger – ISO7730 ———— Modèle adaptatif européen – EN15251
 Modèle adaptatif américain – ASHRAE 55 ———— Modèle bioclimatique de Givoni

Figure 25 : Distribution des températures des modèles de confort et des températures extérieures.

On remarque après la production et la visualisation de ces différents graphiques que:

- Même si ces villes appartiennent à un même groupe dans les classifications internationales comme par exemple Alger et Palerme ou Dubaï et le Caire, leur distribution des températures extérieures sont très contrastées et chaque ville se distingue par des caractéristiques propres à elle, globalement les villes méditerranéennes ont un climat chaud mais avec des températures moins élevées que ce qu'on peut constater à Dubaï et au Caire ou elles sont nettement supérieures, ces températures extrêmes se caractérisent par une plus grande amplitude dans ces zones et avec une durabilité, une persistance et des périodes plus importantes dans le temps que dans les autres villes.
- L'amplitude du spectre des températures varie elle aussi suivant les villes étudiées durant l'année, on constate une plus grande amplitude dans les zones les plus chaudes ou l'écart dépasse les 45°C entre les minimales en période d'hiver et les maximales en période estivale, ces écarts de températures sont plus grands et plus étalés que dans des villes comme Palerme ou ils ne dépassent pas les 30°C, cela rend bien entendu l'adaptation de nos bâtiments plus difficile car ces grandes amplitudes créent des complexités dans le choix des stratégies à entreprendre afin de minimiser les consommations d'énergie tout en garantissant le confort non pas dans une partie mais durant toute l'année.
- Pour ce qui est des modèles de confort, on aperçoit dès la présentation des graphiques de la Figure 25 que le modèle analytique de Fanger représenté par la norme ISO7730 (rouge) suit une ligne droite correspondant à une bande de confort étroite à l'opposé des autres modèles qui suivent une distribution plus harmonieuse et plus en adéquation avec le profil des températures extérieures et des données climatiques, ce qui est conforme à ce qu'on a pu lire et trouver dans nos différentes recherches bibliographiques et différentes lectures sur les modèles de confort et qui expliquaient que le modèle analytique est totalement déconnecté de l'extérieur et impose aux bâtiments et aux différents équipements une température à respecter sans aucun autre choix d'évolution des conditions intérieures et sans aucune prise en compte des paramètres extérieurs, cela se confirme dans notre simulation car cette bande est identique à toutes les autres représentées dans tous les 4 graphiques correspondant aux 4 villes test alors que les données d'entrées introduit dans le modèle pour réaliser la simulation et qui représentent les données météorologiques ne sont pas les mêmes. Précisons cependant que cela concerne bien les températures de confort du modèle ISO 7730 et non pas la consommation que peut induire ce dernier dans les différents contextes.

- Les modèles adaptatifs quant à eux varient durant l'année avec la variation des températures extérieures, cependant même si les deux normes américaine ASHRAE55 et européenne EN15251 traduisent une forme d'adaptabilité dans la manière de fixer et d'évaluer le confort des occupants, ces deux normes n'ont pas le même profil et donc ne définissent pas l'adaptabilité de la même façon, le profil de la norme EN15251 (bleue) accepte et génère des températures plus élevées que celui de la norme américaine ASHRAE55 (vert) que ce soit en été ou en hiver et dans tous les cas étudiés, ajoutant que la variation de température dans le profil d'ASHRAE se modifie en plateaux mensuels créant ainsi un saut dans les températures de confort ce qui peut être désagréable pour les occupants du bâtiment occasionnant une gêne ou un inconfort car la transition dans les températures opératives est brusque et direct même si la différence entre les deux plateaux n'est pas très importante, alors que dans le même temps et dans le modèle européen EN15251, l'évolution des températures de confort est continue, douce et progressive sans réel plateau ni décrochement, cela peut être plus agréable pour certaines personnes et plus intéressante, alors que cette fluctuation permanente des températures même si elle n'est pas importante peut déstabiliser et désorienter le comportement thermique d'autres occupants qui considèrent que la stabilité qu'offre le modèle ASHRAE est plus favorable à l'accoutumance et à l'acclimatation que cette modification permanente des températures intérieures offerte par la norme EN15251.

- Un dernier point qu'on peut évoquer en regardant les graphiques est qu'il existe dans les 04 exemples deux zones distinctes et différentes, une où tous les profils se superposent et sont très proches avec une même distribution et une même évolution dans le temps ce qui traduit une grande concordance entre eux, et une deuxième zone où au contraire un décrochage entre le spectre des températures extérieures et celui des modèles de confort est présent impliquant une absence de concordance et une grande dissension, néanmoins ce qui est encore plus intéressant à observer est que malgré la présence de ces deux zones dans tous les graphiques, leur disposition varie suivant les villes sélectionnées, au Caire et surtout à Dubaï la concordance est plutôt observée dans les mois d'hiver et dans les périodes les moins chaudes de l'année, en été et avec l'envolée des températures atteignant des chiffres extrêmement élevés, le décrochage s'effectue avec les modèles de confort qui eux restent dans des tranches de températures raisonnables, alors que dans le même temps dans la ville d'Alger ou Palerme ce décrochage est du au contraire à des températures plus froides qui s'étalent en période hivernale, en été les profils se rapprochent créant une plus grande concordance et une variation de températures dans le même ordre de grandeur.

3. Besoin en chauffage et en refroidissement

A présent, le deuxième groupe de résultats qui a été traité est celui de la consommation d'énergie pour le refroidissement et le chauffage pour les différentes villes en appliquant les différents modèles de confort, cela a été travaillé de façon à avoir une compréhension aisée des données en essayant de regrouper toutes les consommations pour la même ville dans un seul graphique et pouvoir ainsi appréhender de façon plus facile leur analyse.

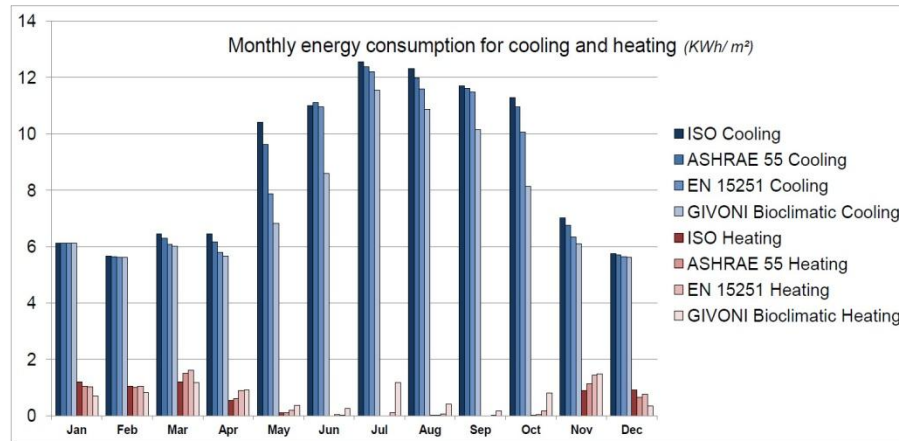
Ce qu'on peut constater dès le départ en observant la Figure 26 est que la consommation pour le refroidissement est bien plus importante que celle du chauffage afin d'atteindre les différents critères de confort, cela est tout à fait normal vu qu'on réalise notre étude dans des zones chaudes où le principal poste de consommation d'énergie est celui du refroidissement, cependant des disparités se créent suivant les villes mais aussi suivant les périodes de l'année. Pour ce type de climat la consommation atteint son maximum dans les périodes les plus chaudes à savoir en été même si il est important de souligner que pour le cas de Dubaï la consommation pour le refroidissement est la plus importante des 04 villes ce qui est compréhensible vu la distribution des températures extérieures plus élevées, cela est plus flagrant pour le modèle ISO 7730 où il se détache de façon importante dans la ville de Dubaï alors que pour les autres villes telles qu'Alger ou Palerme, il reste dans des intervalles comparables aux autres modèles adaptatifs.

Le modèle ISO7730 a la plus importante consommation d'énergie devant les modèles adaptatifs quelque soit la ville étudiée et cela durant toute l'année et durant tous les mois, les besoins atteignent pour ce modèle un maximum au mois de juillet de 12.90 KWh/m² pour la ville de Palerme, 12.56 KWh/m² pour la ville d'Alger, 13.50 KWh/m² et de 14 KWh/m² pour la ville de Dubaï qui est la ville qui enregistre la plus grande valeur. Ajoutant à cela que les valeurs les plus basses sont constatées en hiver avec une demande d'énergie la moins importante observée à Alger de l'ordre de 5.66 KWh/m² au mois de février, Palerme enregistre presque les mêmes besoins en énergie avec 5.68 KWh/m² mais cela pour le mois de décembre. Notons que les modèles adaptatifs dans leur ensemble ont une consommation et des besoins énergétiques inférieurs à ce qu'on vient de décrire pour le modèle ISO 7730.

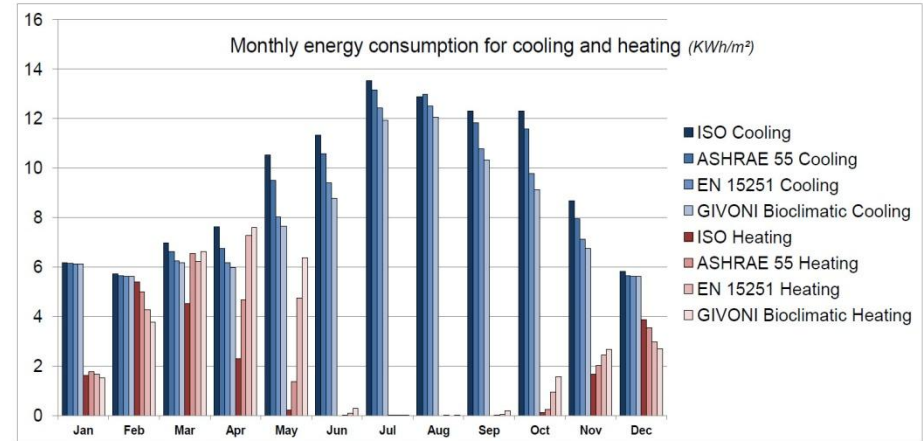
Cette diversité de chiffres et ces différences de consommation entre les différentes villes mais aussi leur fluctuation durant l'année nous prouvent la complexité de traiter ces questions de consommation et d'efficacité énergétique, même si on est dans un même climat (chaud dans notre étude), il est difficile de faire des généralités et des extrapolations maladroites et hasardeuses en étudiant 01 seul cas qui représenterait un ensemble plus

complexe, c'est pour cela que ces résultats confortent notre réflexion du début de prendre le parti pris d'étudier 04 villes différentes avec leur caractéristiques même si elles appartiennent toutes à un climat chaud.

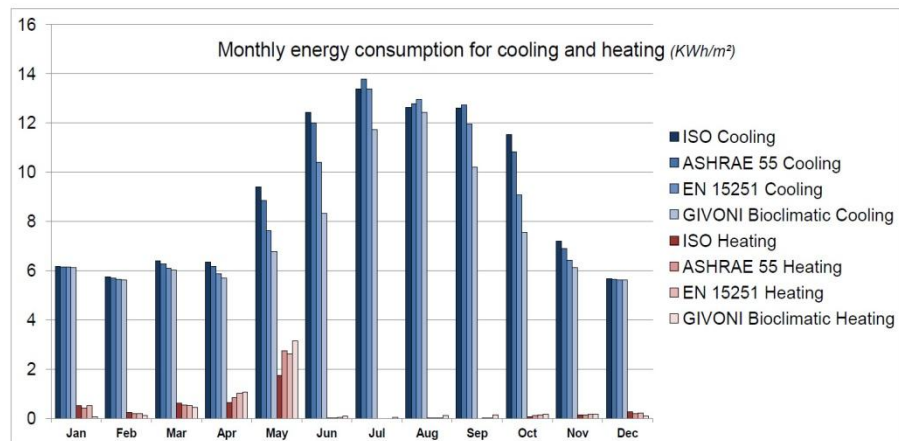
Tous ces graphiques et valeurs présentés dans cette partie résultats seront décryptés et analysés plus en profondeur dans la partie suivante (discussion) afin de pouvoir comprendre les causes et les effets de ces disparités, répondre à nos questionnements et à nos interrogations.



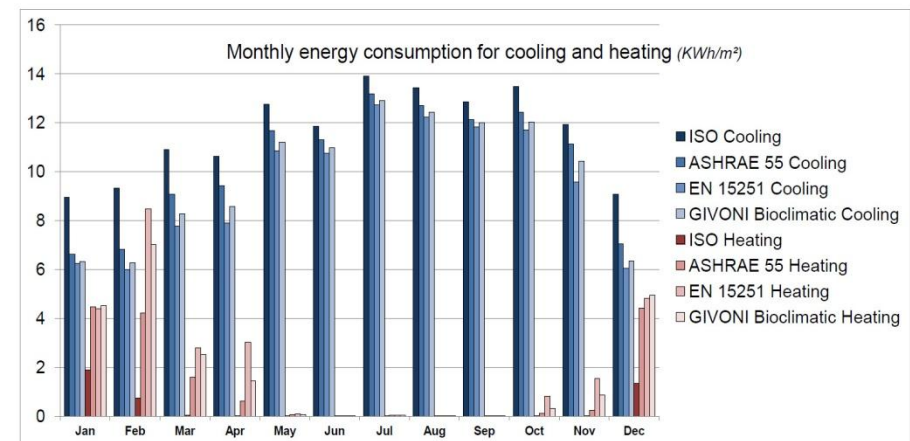
a) Alger



b) Le Caire



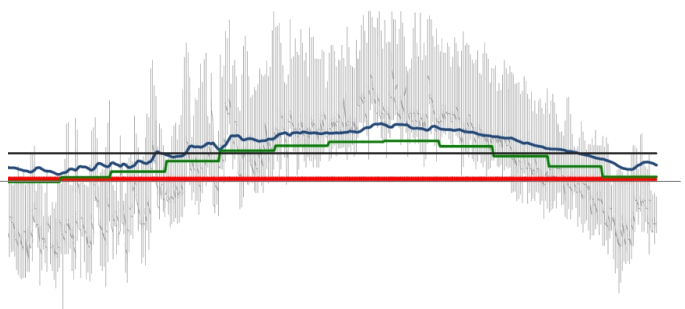
c) Palerme



d) Dubaï

Figure 26 : Consommation mensuelle d'énergie pour le chauffage et le refroidissement.

Discussion



V- Discussion

Nous allons entamer dans cette partie et après avoir exposé les différents résultats de la simulation, l'analyse des divers graphiques produits afin d'essayer de mieux comprendre les disparités entre les différentes villes mais aussi entre les différents modèles de confort en terme de besoin énergétique, faire émerger les principales causes de ces écarts mais aussi proposer des solutions d'amélioration de l'efficacité du bâtiment et avoir de meilleurs résultats pour qu'au final nous puissions d'une part sélectionner le meilleur modèle de confort à adopter pour des zones climatiques chaudes (arides et désertiques) qui permettra le meilleur gain en énergie, et d'autre part introduire à l'avenir de nouvelles règles d'adaptation pour les systèmes de contrôle du confort dans les bâtiments NZEB's.

1. Analyse du profil

Les différents schémas de la Figure 25 mettant en parallèle à la fois les données de températures extérieures de chaque ville et la distribution des températures intérieures après l'application des différents modèles de confort sélectionnés révèlent tout la complexité de choisir un modèle de confort afin d'assurer un environnement intérieur agréable et acceptable car chaque cas étudié est différent impliquant l'emploi de stratégies diverses et variées pour réduire les besoins énergétiques, le profil des températures à Alger ou même à Palerme diffère de celui de Dubaï ou du Caire.

Pour le premier cas représentant la ville d'Alger (Figure 25-a), on constate une concordance entre les profils des modèles de confort adaptatifs que ce soit celui introduit dans la norme européenne EN15251 (bleue) ou américaine ASHRAE55 (vert) et celui des températures extérieures, l'évolution de la courbe est la même et l'amplitude est du même ordre de grandeur en période d'été mais ce dernier se détache en période d'hiver à cause de la chute nette des températures extérieures créant un écart avec celles des modèles de confort, cela nous démontre qu'il est aisé en période d'été de garantir un confort intérieur de façon naturelle sans recours à des systèmes de conditionnement d'air ou de climatisation ce qui impliquera une réduction de la consommation d'énergie, mais d'un autre côté ce profil nous oblige afin d'assurer le bien être intérieur des occupants à adopter une stratégie du chaud

pour combler l'écart décrit précédemment en période hivernale (Figure 27) et être dans le même temps efficace énergétiquement.

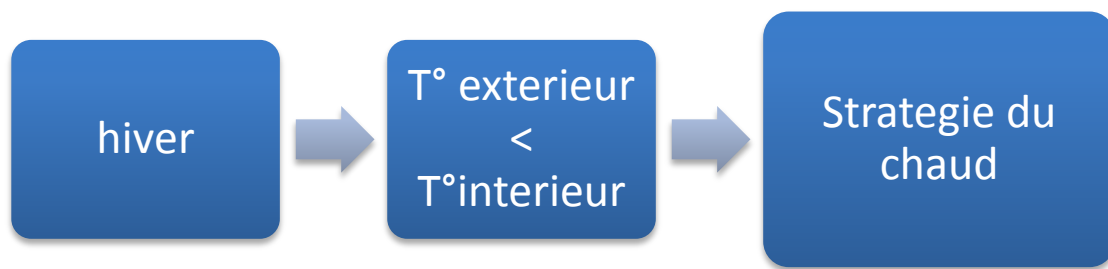


Figure 27 : Stratégie du chaud.

Un bâtiment avec une grande compacité, une meilleure étanchéité à l'air et une meilleure isolation des parois extérieures nous permettra de gagner en efficacité et d'accroître les performances du bâtiment réduisant la consommation d'énergie tout en garantissant le confort, rien qu'avec cette dernière mesure le bénéfice en énergie économisé dans ce type de climat (chaud) peut atteindre les 30% sur l'année pour des parois mieux isolées avec une attention particulière aux nœuds constructifs afin d'éviter les ponts thermiques.

L'étude de Friess & al. (2012) menée sur une maison unifamiliale dans la ville de Dubaï représentant un climat chaud prouve cela et va dans notre sens car avec seulement 5 cm d'isolant (EPS) en façade (à l'extérieur), le gain dépasse les 20 % et atteint presque les 30% (29.4%) si on passe à 16 cm d'isolant à l'extérieur comme mentionné dans le Tableau 15, cela s'explique évidemment par l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant et la coupure du pont thermique entre le porteur et le remplissage du mur (bloc béton) qui est primordiale car elle seul nous fait économiser 23.3% de la consommation totale (option B dans le Tableau 15). Cependant ce qui est intéressant à ajouter et à mentionner dans cette étude est qu'il n'y a presque pas de différence du point de vue énergétique entre un bloc de remplissage isolé (avec une isolation à l'intérieur) et le même bloc non isolé, la différence est de plus ou moins 1 à 1.5% mais le coût de construction est moins important pour le bloc non isolé, ce qui revient à dire qu'il est plus rentable de construire avec un bloc non isolé et

ajouter une couche d'isolation par l'extérieur que de construire avec un bloc isolé, ajoutant à cela le bloc non isolé « *offre plus de masse thermique ce qui réduira encore la demande en amortissant l'oscillation des températures quotidiennes* » (Friess & al., 2012, p.31).

Insulation option	EUI (kWh/m ² a)	Change with base case (%)
A – as built	205	0
B – as built + 50 mm EPS on TB only	161	–23.3
C – as built + 50 mm EPS full	158	–24.5
D – as built + 160 mm EPS full	148	–29.8
E – non-insulated block	220	+10.6
F – non-insulated block + 50 mm EPS	161	–22.9
G – non-insulated block + 160 mm EPS	149	–29.4

Tableau 15 : Consommation énergétique suivant la composition des murs extérieurs (Friess & al., 2012, p.31).

Avec ces mesures, les espaces de bureaux ont été surchauffés en période estivale, on recommande dans ce cas l'utilisation d'un refroidissement passif avec une ventilation naturelle, qui peut être aidée par une ventilation mécanique si les températures sont importantes en particulier en soirée avec le recours au Free Cooling, grâce à cette technique on économisera l'énergie qui pouvait être consommée par un système de refroidissement actif en utilisant l'énergie gratuite de l'air extérieur et rafraichir ainsi le bâtiment en évacuant la chaleur accumulée. Durant la journée, cela requière une pulsion de volume d'air importante dans le bâtiment (6 à 8V/h sont généralement utilisés) sans conséquence du point de vue du confort car le bâtiment est inoccupé le soir.

Une seconde piste qui peut être explorée et utilisée est de travailler sur la conception des bâtiments en introduisant des systèmes d'ombrage comme les brises soleil réglables et orientables afin de diminuer l'incidence, le rayonnement et la radiation du soleil, l'orientation des ouvertures en façade, ou encore l'utilisation de vitrage performant à basse émissivité (coefficient de transmission thermique U bas) et à haute réflectivité (facteur solaire g bas) sont généralement recommandés pour les climats chauds et dans des environnements intérieurs à refroidissement (Cooling dominated) car en période hivernale la consommation énergétique est affectée beaucoup plus par les pertes de chaleur à travers le vitrage que par les gains dus au rayonnement solaire alors qu'en période estivale les besoins sont plus impactés par le rayonnement et l'incidence solaire que par les flux de chaleur traversant le vitrage (Gasparella & al., 2011), ce qui à pour résultat l'adoption pour de meilleurs performances d'un vitrage triple comme le suggère la recherche citée ci-avant.

Toutes ces mesures peuvent finalement nous assurer un confort d'hiver tout en préservant le confort d'été sans l'ajout d'un système actif de climatisation.

Cette analyse s'applique de la même façon à la ville de Palerme (Figure 25-c), où on a un profil similaire à celui d'Alger avec des températures de confort d'été comparables aux températures extérieures traduites par une grande concordance des profils de températures mais un décrochage en saison hivernale où il est indispensable de chauffer le bâtiment afin de garantir les critères d'acceptabilités et de confort. Là aussi une stratégie du chaud est appliquée pour augmenter l'efficacité du bâtiment tout en respectant les critères fixés par les différents modèles à savoir celui de la norme ASHRAE55 ou celui de la norme EN15251 durant toute l'année.

Le cas de la ville de Dubaï représenté dans la Figure 25-d est tout à fait différent, en effet les profils s'associent bien en période d'hiver où on constate que les températures de confort suivent la même tendance que les températures extérieures et sont dans le même intervalle mais se détache en période d'été où les températures extérieures sont nettement plus élevées et bien plus chaudes avec une moyenne maximale pour le mois d'Aout de $40.4^{\circ}\text{C}^{20}$ et des pointes de l'ordre des 47°C lors des moments les plus chauds de la journée, dans ce cas une stratégie du froid (Figure 28) s'impose afin de satisfaire les exigences des modèles de confort et dans le même temps augmenter l'efficacité énergétique du bâtiment, cela passe par une plus grande inertie des parois et du plancher afin de capter la chaleur en journée en activant leurs masses thermiques et la restituer la nuit où les températures sont plus basses et les locaux inoccupés, utiliser un refroidissement naturel intensif en soirée permettra de dissiper la chaleur accumulée durant la journée même si dans le cas de la ville de Dubaï, cette mesure reste insuffisante et à des résultats moins significatifs en comparaison avec le cas d'Alger à cause notamment de la distribution des températures. En effet, on constate que même si les températures de l'air extérieur diminuent considérablement en soirée et peuvent descendre à une température moyenne minimal de $29.3^{\circ}\text{C}^{14}$ pour le mois d'Aout, cela reste insuffisant pour refroidir juste avec des moyens naturels les locaux car ces minimales restent presque égales aux températures de confort recommandées par les modèles adaptatifs et en particulier le modèle européen introduit dans la norme EN15251 et donc ne peuvent pas dissiper l'excédant de chaleur accumulée à cause des différentes sources et différents émetteurs (le rayonnement et l'incidence solaire, les gains internes... etc.).

²⁰ Données météorologiques extraites du WMO (World Meteorological Organization)
<http://worldweather.wmo.int/en/home.html> consulté le 23/10/2016.

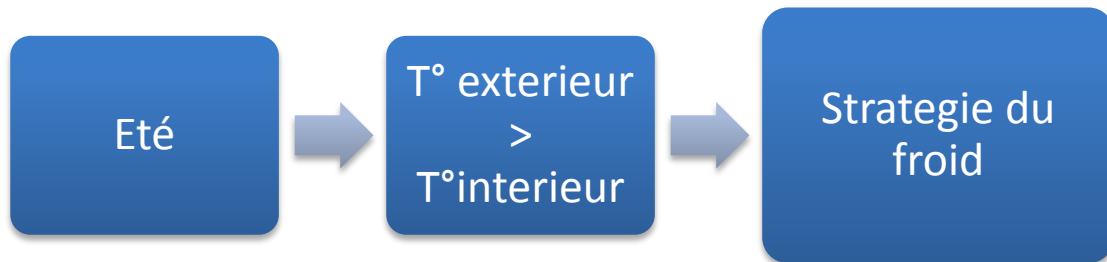


Figure 28 : Stratégie du froid.

Afin de remédier à cette faiblesse, à ce déficit et s'ajoutant à ces mesures, nous avons incorporé un système de refroidissement actif qui va être utilisé uniquement quand les températures sont extrêmes et insupportables pour les occupants. Pour ce cas précis, cette utilisation se fera durant une grande partie de l'année vue les températures exceptionnelles de cette région qui s'étalent du mois de mai à fin octobre comme l'indique la distribution des températures extérieures dans la Figure 25-d ou elles sont largement supérieures à celles des modèles de confort pendant cette période.

Notons qu'il est aussi possible d'utiliser un système de poutre froide pour le refroidissement qui nous permettra comme le conditionnement d'air d'assurer un environnement intérieur acceptable, ces poutres convectives intégrées aux faux plafonds utilisent l'énergie frigorifique de l'eau froide qui les parcourt pour diminuer la température de l'air ambiant, elles doivent être installées pour un fonctionnement optimal à l'opposé des ouvertures (coté couloir) pour d'une part éviter les coulées froides sur les occupants créant un inconfort local et d'autre part pour respecter la boucle convective et la circulation naturelle de l'air, en effet l'air plus chaud coté fenêtre à cause de l'incidence et le rayonnement solaire remonte, passe par les poutres froides et redescend le long du couloir du coté opposé car il est plus froid et donc plus lourd comme le démontre la Figure 29, l'avantage supplémentaire est que ce système est plus intéressant énergétiquement grâce aux températures du circulateur utilisé, l'eau froide à haute température entre 16 et 18°C afin d'éviter les risques de condensation nous permet un rendement plus intéressant pour les machines frigorifiques. Néanmoins, la

puissance de ce type de dispositif limite considérablement son utilisation exclusive, on sait que le système de poutre froide génère une puissance moyenne de l'ordre de 50 à 60 W.m² si on ne prend pas en compte l'incidence directe qui est écartée dans ce cas à cause des différents dispositifs d'ombrages pour réduire l'impacte du rayonnement solaire dans les locaux, cette puissance reste insuffisante pour combler les apports et les gains internes durant la journée qui s'ajoutent à l'écart de températures (ΔT) entre l'air intérieur et les températures extérieures très élevées.

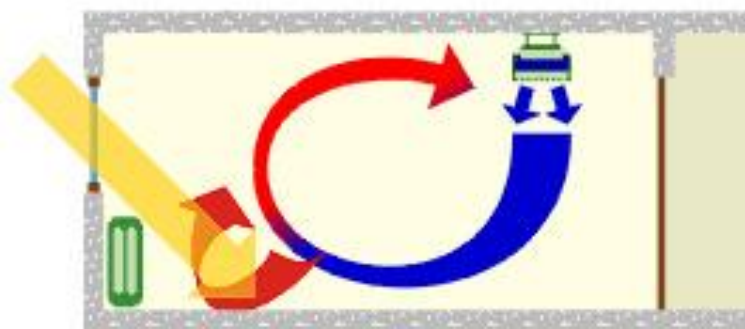


Figure 29 : Emplacement des poutres froides dans les locaux de bureaux et boucle convective.

Au final, on recommande l'utilisation d'un système mixte ou hybride pour assurer les températures de consignes et les critères préconisés par les modèles de confort adaptatif tout en réduisant les besoins énergétiques, ce type de système fait intervenir un maximum de méthodes passives telle que la ventilation naturelle de jour ou de nuit, ou active à faible consommation d'énergie tel que le refroidissement par dalles actives (rayonnement) ou par évaporation directe de l'air (refroidissement évaporative) couplés à un conditionnement d'air traditionnel supplémentaire soit à débit constant (CAV) ou à débit variable (VAV) pour une utilisation dans les conditions les plus extrêmes afin de composer l'augmentation des températures (Brager, 2006), on réduira ainsi la consommation d'énergie de 40 jusqu'à 80% suivant la combinaison utilisée et l'importance des gains internes comme le démontre le travail de Ezzeldin & Rees (2013) ou ils étudient le potentiel énergétique du refroidissement mixte dans les climats arides prenant 04 villes testes similaires aux nôtres : Alice Springs (Australie), Al Arish (Egypte), Manama (Bahreïn) et Madinah (Arabie Saoudite) toutes classées BWh suivant la classification de Koppen et prouvent le bénéfice de tels systèmes sur la consommation en comparaison avec les systèmes traditionnels de refroidissement actif

qui sont 3 à 4 fois plus énergivore, tout en gardant les mêmes conditions intérieures de confort acceptables conformément à la norme américaine ASHRAE.

2. Potentiel énergétique

Les différents résultats nous démontrent que suivant le modèle de confort choisi, les besoins en énergie pour assurer le refroidissement et le chauffage varient énormément, ainsi chaque modèle introduit comme donnée d'entrée dans le logiciel de simulation DesignBuilder nous génère des consommations d'énergies distinctes et variées, cela est plus marqué et d'autant plus flagrant que si l'on compare la consommation entre le modèle analytique de Fanger avec les modèles adaptatifs que ce soit celui de la norme américaine ASHRAE55, européenne EN15251 ou le modèle bioclimatique de Givoni et cela dans toutes les villes étudiées à savoir la ville d'Alger, du Caire, Palerme ou encore Dubaï comme le démontre la Figure 30.

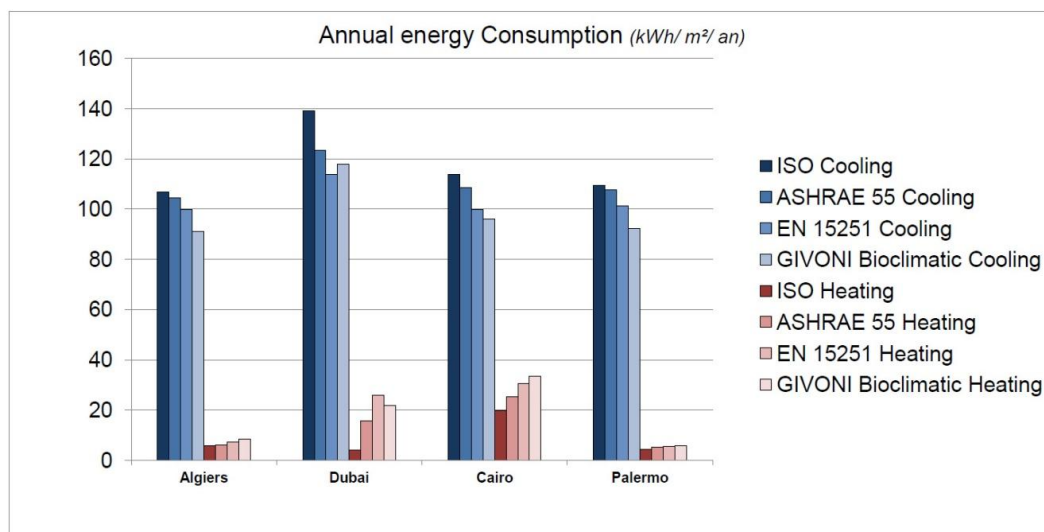


Figure 30 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et le refroidissement.

Cela peut s'expliquer par le fait que dans le modèle de Fanger introduit dans la norme ISO7730, l'exigence de confort est très élevée et la bande de température afin de garantir le bien être des occupants est très étroite, la norme nous exige des températures fixes et stables durant toute l'année en dépit des divers paramètres qui peuvent influencer la température ambiante tels que les gains internes, la température extérieure...etc., ce qui explique une consommation d'énergie annuelle très importante qui atteint pour le

refroidissement 109.49 kWh/m²/an pour la ville de Palerme, 106.77 kWh/m²/an pour la ville d'Alger, 113.84 kWh/m²/an pour le Caire ou même 139.03 kWh/m²/an pour la ville de Dubaï afin de garantir ce niveau de contrainte et le même confort pour toutes ces villes. Dans le même temps les exigences dans les modèles adaptatifs sont moins élevés et la plage de températures de confort plus large, elles peuvent atteindre jusqu'à 30°C pour le modèle bioclimatique de Givoni, ce qui a pour résultat une diminution des besoins en énergie pour toutes les villes tests. Cette tolérance dans les températures de confort est du à leur relation avec les températures extérieures qui les influencent directement, ce qui revient à dire que quand les températures extérieures augmentent en période d'été par exemple, les températures de consignes des modèles adaptatifs suivent cette évolution et augmentent elles aussi réduisant l'impacte de la variation des températures entre le climat extérieur et celle des exigences de ces différents modèles que ce soit le modèle de la norme américaine ASHRAE55 ou européenne EN15251 (ΔT moins important) amortissant les besoins en énergie, alors que dans le modèle de Fanger introduit dans la norme ISO 7730 cette écart est proportionnel à la hausse des températures extérieures, plus elles augmentent plus l'écart avec la température de consigne à l'intérieur des locaux ΔT augmente ce qui induit une consommation accrue pour compenser cette différence comme schématisée dans la Figure 31.

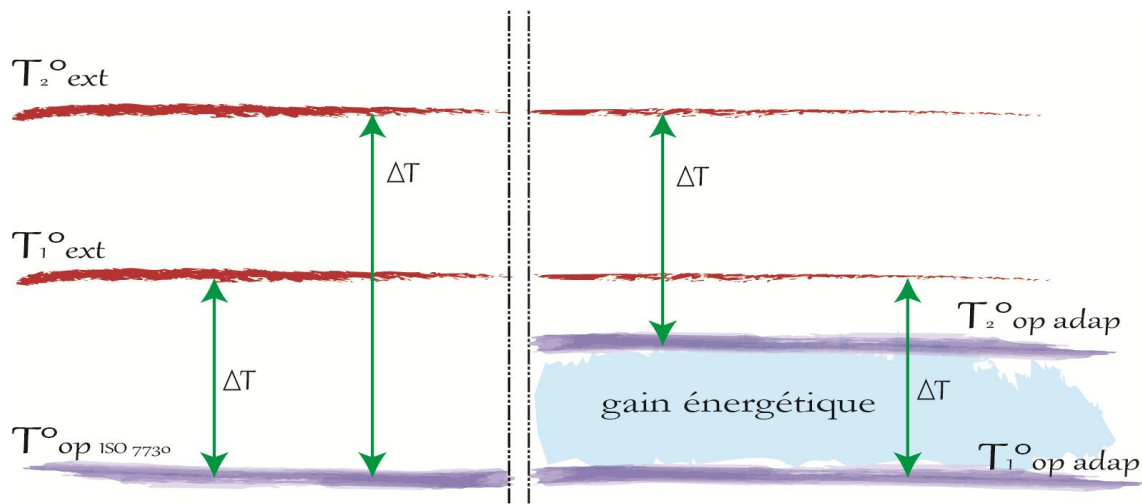


Figure 31 : Flexibilité des seuils de températures entre le modèle analytique et le modèle adaptatif et gain énergétique (variation des écarts de températures).

Malgré que le modèle de Fanger implique la plus grande consommation d'énergie pour assurer les exigences de confort dans toutes les villes tests comme expliqué dans le paragraphe précédent, néanmoins cela reste très disparate et inégale entre les villes, à Alger par exemple les besoins en énergie pour fournir un environnement intérieur acceptable suivant les critères de la norme ISO 7730 sont moins importants (106.77 kWh/m²/an) que ceux du Caire et encore moins que ceux de la ville de Dubaï qui enregistre la plus forte consommation à savoir 139.03 kWh/m²/an pour le même bâtiment de référence et les mêmes températures de confort. Pour rappel, la norme ISO 7730 (section II.1.5.a) extraite du modèle de Fanger exige pour une activité sédentaire de bureau avec un $\text{met} = 1.2$ et un taux d'habillement de 1clo en hiver et de 0.5clo en été, une température dans les locaux de 22°C en hiver et de 24.5°C en été afin de considérer que le confort intérieur est garanti.

L'explication principale de ces inégalités est le type de climat, même si toutes les villes considérées dans notre étude s'affilient à un climat chaud, il existe des différences et des caractéristiques propres à chacune d'entre elles suivant la situation géographique dénommée « sous climat ou sous ensemble » par Ezzeldin & Rees (2013) dans son étude « *The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates* », en effet ces sous climats nous fournissent des paramètres environnementaux et météorologiques divers, les données climatiques des zones à climat chaud et humide différent de ceux des zones à climat chaud aride et désertique tel que celui de la ville de Dubaï ou du Caire et sont toutes aussi différentes des villes de Palerme ou d'Alger qui sont considérées comme méditerranéenne même si au final, toutes ces zones s'inscrivent suivant les classifications internationales comme chaudes. La conséquence de cela est une variation dans les températures extérieures durant l'année, une durée d'ensoleillement différente et donc une intensité, une incidence sur notre bâtiment qui varie suivant les saisons et suivant la situation géographique de la ville test impliquant des gains du au rayonnement solaire direct ou indirect inégaux qui génèrent une surchauffe dans le local plus ou moins importante modifiant au final les besoins de refroidissement, s'ajoutant à cela et avec l'augmentation des températures extérieures, l'augmentation de l'écart ΔT entre ces dernières et la température ambiante déjà expliquée dans le premier paragraphe.

Notons qu'il est aussi important de souligner que l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur fait varier les déperditions et les échanges thermiques via les différentes parois du bâtiment car plus le ΔT est grand plus le flux de chaleur transitant entre les deux environnements par l'enveloppe est important comme indiqué dans l'équation ci-après, ce qui a au final un impact sur les besoins de refroidissements et de chauffages afin de garder la même bande étroite de confort faisant accroître la consommation finale.

$$Q_T = \sum_K [H_{T,K} (\theta_i - \theta_{e,k})] \cdot t$$

Avec

Q_T : Déperdition de chaleur par transmission, MJ.

$H_{T,K}$: Coefficient de déperdition de l'élément K, W/K.

θ_i : Température intérieure du bâtiment ou de la zone calculée, °C.

$\theta_{e,k}$: Température extérieure ou de la zone adjacente à l'élément K, °C.

t : durée de la période de calcul, en Ms.

Une autre conséquence des différences de ces sous climats représentés dans notre étude par les 04 villes tests est la variation des gains en énergie et le bénéfice apporté par l'adoption des modèles adaptatifs en comparaison avec le modèle analytique, bien que l'augmentation de l'efficacité énergétique en utilisant ce type d'approche a déjà été décrit et expliqué précédemment, on constate des disparités en terme d'énergie sauvegardée et conservée pour ces modèles suivant chaque cas d'étude comme le démontre la Figure 32 représentant les gains (en %) des différents modèles adaptatifs par rapport au modèle de Fanger.

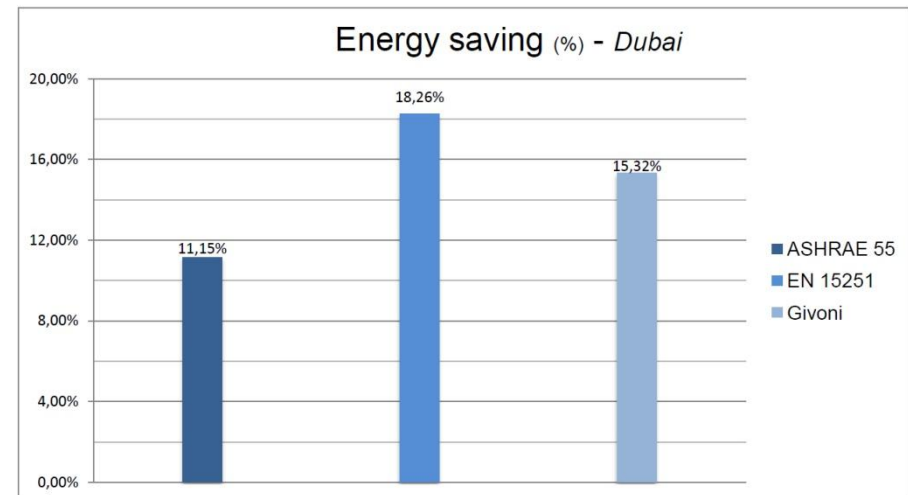
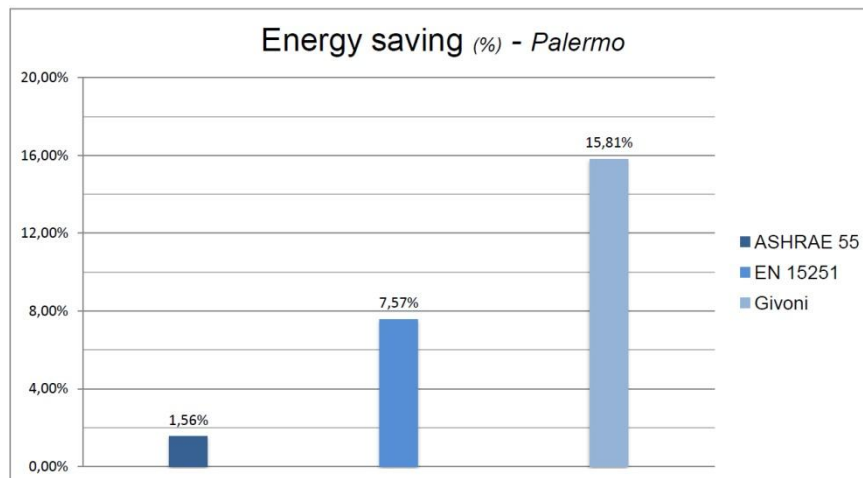
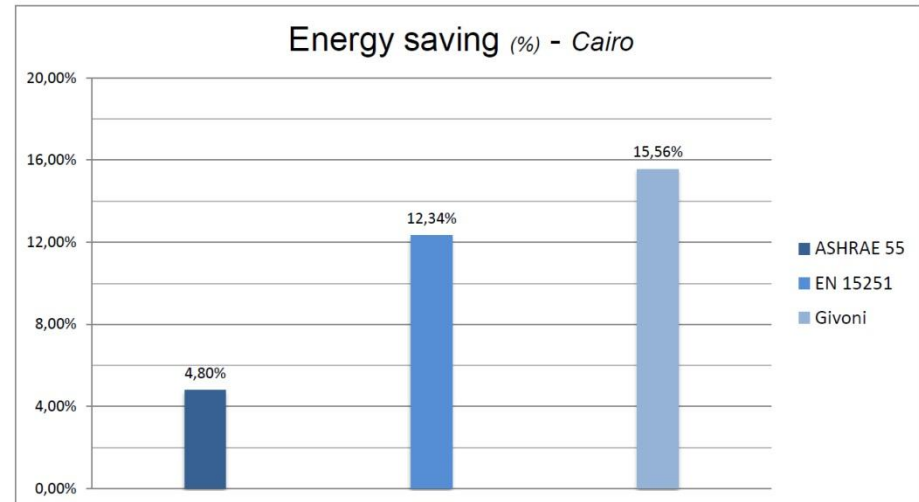
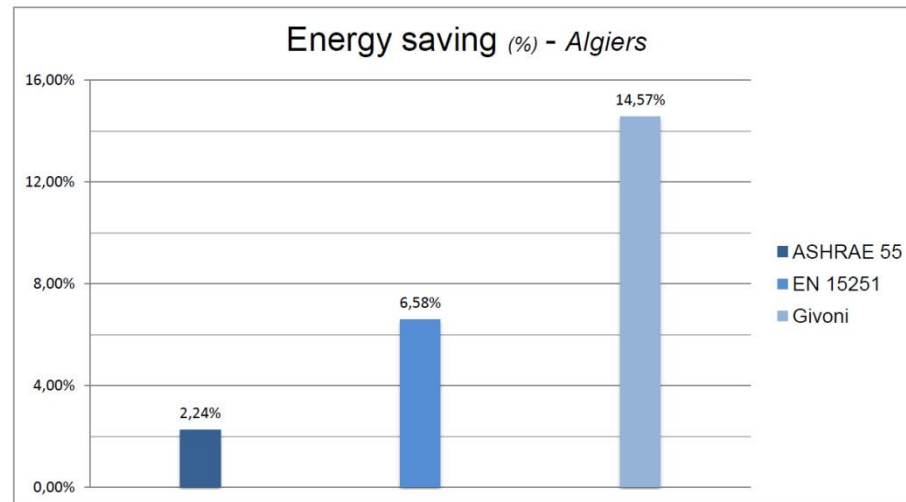


Figure 32 : Pourcentage d'énergie conservée pour le refroidissement par les modèles adaptatifs par rapport au modèle de Fanger (ISO7730).

Les disparités entre les charges de refroidissement sont flagrantes et assez importantes suivant les villes et le modèle adaptatif pratiqué, dans le cas de la ville de Palerme les réductions des besoins énergétiques et suivant les normes ASHRAE55, EN15251 et la norme bioclimatique de Givoni varient par rapport à la norme ISO7730 respectivement de -1.56% (107.78 kWh/m²/an), -7.57% (101.20 kWh/m²/an) et -15.80% (92.18 kWh/m²/an) pour garantir un confort intérieur, cet écart d'économie d'énergie et l'accroissement des performances du bâtiment sont encore plus importants si on prend la ville du Caire avec respectivement -4.80% (108.38 kWh/m²/an), -12.34% (99.79 kWh/m²/an) et -15.56% (96.13 kWh/m²/an) ou la ville de Dubaï où cela grimpe à des valeurs de -11.5% (123.52 kWh/m²/an), -18.26% (113.63 kWh/m²/an) et -15.32% (117.72 kWh/m²/an).

Les enseignements qu'on peut tirer de ces disparités sont essentiels et très importants du point de vue énergétique mais aussi du point de vue de la recherche scientifique en terme général, on découvre que plus le climat est chaud et aride plus l'efficacité de l'adoption des modèles de confort adaptatif est pertinente et a du sens, En effet et comme mentionné dans le paragraphe précédent, les gains dans la ville d'Alger varient entre 2% et 14.5%, le même ordre de grandeur est exprimé pour la ville de Palerme, ces deux villes ayant les moyennes de températures journalières les moins élevées dans notre travail mais dans le même temps ce pourcentage passe à 5% jusqu'à 15.56% pour la ville du Caire et atteint presque 20% pour la ville de Dubaï qui ont un climat plus dur et plus aride avec des températures journalières qui peuvent être très chaudes, ceci se confirme si l'on regarde de plus près la distribution des besoins énergétiques mensuelles pour toute l'année présentée dans la Figure 26, ou pour le cas d'Alger ou de Palerme la consommation d'énergie est presque la même pour tous les modèles de confort que ce soit celui de la norme ISO7730 (statique) ou bien ceux des normes américaine ASHRAE55, européenne EN15251 ou encore bioclimatique de Givoni (adaptatifs) évaluée autour de ± 6 kWh/m² pour le mois de janvier et ± 5.5 kWh/m² enregistrée au mois de décembre, ces chiffres sont proches de ceux de la ville de Palerme à la même période de l'année (les mois les plus froids), mais l'écart se creuse et les disparités augmentent avec l'augmentation des températures extérieures (période estivale). Cette logique et ce schéma ne sont pas respectés dans les autres villes tests à savoir la ville du Caire et celle de Dubaï où la différence est plus flagrante, dans ce dernier cas les disparités et donc le potentiel gain en énergie s'étalent sur toute l'année (ils existent en été comme à Alger ou Palerme mais persistent en hiver), ou les besoins en refroidissement s'élèvent au mois de janvier à 9 kWh/m² pour la norme ISO7730 alors que le modèle bioclimatique de GIVONI n'a besoin que de 6.32 kWh/m².

L'analyse de ces données et de leurs différences dans la conservation d'énergie et donc des potentiels gains qui en résultent sont la conséquence de plusieurs paramètres, le principal d'entre eux qu'on peut citer est la similitude ou en d'autre terme la convergence des

températures de consignes des différents modèles de confort en période hivernale dans des sous climats chauds type méditerranéen représentés par Alger ou Palerme, dans ces villes on a d'un côté la température de consigne pour le modèle analytique qui est fixe et est estimée dans les 21°C et de l'autre côté des températures de consigne pour les modèles adaptatifs qui sont dans le même intervalle et dans le même ordre de grandeur que celui de la norme ISO7730 à cause notamment des températures extérieures assez basses dans la période d'hiver ce qui au final nous donne la même consommation d'énergie pour assurer un environnement intérieur acceptable, car les températures de consignes sont presque les mêmes pour tous les modèles et donc minimisent le gain potentiel qu'on pouvait tirer de l'application d'un des modèles adaptatifs, par la suite plus les températures augmentent plus cela devient favorable aux modèles adaptatifs car les températures de consignes augmentent elles aussi réduisant le besoin en énergie alors que dans le même temps le modèle ISO 7730 reste stable et conserve ses exigences en terme de confort. Cependant, à Dubaï les températures sont élevées toute l'année et deviennent extrêmes en été, l'hiver les températures de confort des modèles adaptatifs sont déjà supérieures à celle du modèle de Fanger parce que les températures extérieures dépassent déjà les 14°C avec une moyenne mensuelle pour le mois de décembre qui atteint les 21.3°C²¹, 19.3°C¹⁵ pour le mois de janvier et 20.5°C¹⁵ pour le mois de février considérés comme les mois les plus froids de l'année et donc ces données climatiques qui nous créent déjà en hiver des températures de consigne pour la norme ASHRAE55 ou encore EN15251 différentes (supérieures) de celle de la norme ISO7730 génèrent une efficacité supérieure de notre bâtiment, la suite est similaire au cas d'Alger ou Palerme, puisque plus la température augmente plus le gain est important pour atteindre au final des réductions des besoins énergétiques pour l'année supérieure à Dubaï ville la plus chaude qu'à Alger ou Palerme, villes plus tempérées.

Notons que même la consommation de chauffage est affectée par ces différences de climat car dans les climats désertiques en plus des températures élevées en journée augmentant les besoins de refroidissement en période d'hiver, les besoins en chauffage sont aussi plus importants que les villes à climat méditerranéen car les nuits sont bien plus froides et les températures bien plus basses le soir. Cet écart de température caractéristique des climats désertiques et arides est la principale cause de l'augmentation des besoins énergétiques des bâtiments implantés dans ces zones mais dans le même temps l'adoption de modèles moins énergivores tels que les modèles adaptatifs prend tout son sens et augmente leur efficacité et leur pertinence.

²¹ Données météorologique extraites du NCMS : The National Center of Meteorology and seismology (Ministry of presidential affairs) : <http://www.ncms.ae/en/climate-reports-yearly.html?id=8803> consulté le 25/10/2016.

La question qu'on peut dès lors se poser après cette analyse est l'utilité des modèles adaptatifs tel qu'introduits dans la norme ASHRAE55 ou encore la norme EN15251 dans des climats moins chauds ou même tempérés comme on peut les trouver dans nos latitudes et dans la majeure partie de l'europe et des pays européens ?

Cette thématique est d'actualité car les modèles adaptatifs sont utilisés de nos jours de plus en plus et sont une partie intégrante des réflexions qu'ont les concepteurs et les ingénieurs afin de concevoir des constructions de qualité répondant aux différents critères de confort et assurer le bien être des utilisateurs, la question est d'autant plus importante que ces modèles ont intégré comme on a pu le voir depuis le début de notre travail différentes normes européenne ou américaine et deviennent des lignes directrices des différentes politiques nationales pour réduire la dépendance énergétique, la consommation des bâtiments et leur empreinte carbone. Bien qu'il soit avéré que ces modèles sont moins énergivores que le modèle classique non adaptatif utilisant un système de climatisation classique, le gain est toutefois faible et dans certaines situations quasi nul comme on a pu le voir dans nos résultats de simulation présentés dans les sections précédentes pour la ville d'Alger ou Palerme par exemple ou il ne dépassait pas dans le meilleur des cas les 7.5% pour le modèle ASHREA 55 et le modèle EN 15251, cela se confirme dans les résultats de l'étude de Henze & al. (2007) qui traite d'un immeuble de bureaux situé à Fribourg au sud ouest de l'Allemagne qui a un climat tempéré et où le gain en énergie dû à l'adoption du modèle adaptatif européen EN15251 est seulement de 6% en moins que la consommation totale d'énergie avec le modèle ISO7730, le bénéfice est en grande partie dû aux ventilateurs qui à eux seuls représentent 51% des économies d'énergies mais il est à préciser que lors de l'utilisation de données climatiques de l'année 2003 qui est considérée comme une année extrême à cause d'épisodes de chaleurs et de canicules qui ont touché la majeure partie du globe, les réductions des besoins énergétiques avec l'utilisation du modèle de confort EN15251 étaient un peu plus importantes.

On peut aller encore plus loin et avoir des résultats et des conclusions plus extrêmes et inattendus si on utilise la même méthode mais avec des données climatiques de la ville de Maastricht au Pays Bas comme a pu le constater Sourbron & Helsen (2011) qui ont simulé les besoins en énergies d'un immeuble de bureaux orienté Nord-Sud suivant les différents modèles de confort (ISO7730, EN15251, ASHRAE55 pour cette étude) et ont révélé le faible potentiel de réduction énergétique et même l'effet pervers et contreproductif que pouvait apporter ce type de modèle adaptatif dans ce type de climat tempéré d'europe occidentale. En effet, leur travail démontre que l'adoption d'un modèle adaptatif ne se traduit pas nécessairement par une réduction de la consommation, le modèle adaptatif de la norme ASHRAE55 nous génère au contraire encore plus de besoin pour le refroidissement, l'augmentation par rapport au modèle ISO7730 peut varier de 7% à 10% et atteint même les

15%, ils expliquent cela par le fait qu'à Maastricht les températures ne sont jamais très élevées réduisant le bénéfice potentiel comme dans le premier exemple mais ce qui est plus important est « *qu'ils imposent des températures plus basses en hiver et en mi saison* » (Sourbron & Helsen, 2011, p.430) ce qui pénalise encore plus ce modèle. Notons pour cette exemple que même avec l'utilisation de données climatiques typiques de l'année la plus chaude à savoir 2003, les résultats sont les mêmes avec une consommation plus importante du modèle adaptatif ASHRAE55 en comparaison avec le modèle analytique ISO7730 même si il est primordial de dire que cette surconsommation a néanmoins diminué et est passée à 3% à 4% ce qui affirme encore plus l'intérêt d'utiliser les modèles de confort adaptatifs dans des environnements à températures plus élevées.

De la même façon, Van Hoof & Hensen (2007) concluent leurs travaux sur le confort adaptatif et son applicabilité dans des climats modérés et tempérés, ils indiquent dans leur article intitulé « *Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones* » que la faiblesse des modèles de confort adaptatifs est qu'ils sont applicables dans les climats tempérés qu'en période d'été à savoir de fin mai à septembre (comme on a pu le constater dans nos résultats pour la ville d'Alger), c'est là ou on peut avoir un gain en efficacité énergétique même si ce dernier est très limité et n'est guère satisfaisant, mais ils soulignent qu'avec des bâtiments naturellement conditionnés et avec un très haut degrés de contrôle des occupants, le bénéfice peut atteindre les 10% en appliquant le modèle adaptatif ASHRAE55, ils se basent sur une simulation énergétique effectuée sur un bureau standard pour deux localisations différentes, la première à Eindhoven aux Pays bas et la seconde en République Tchèque. Cependant dans les pays d'europe, la plupart des immeubles de bureaux sont déjà équipés d'une certaine forme de climatisation et dans ce cas le résultat de l'adoption de la norme ASHRAE55 est au contraire pénalisante car elle augmente la consommation par rapport à la norme ISO 7730 de 10% en moyenne et dépasse même les 20% dans certains cas.

Au final et comme on a pu le comprendre tout au long des derniers paragraphes, le constat est plus que mitigé en ce qui concerne l'applicabilité des modèles adaptatifs dans des climats modérés tel qu'en europe occidentale et l'incertitude sur leur efficacité très importante réduisant considérablement leurs champs d'application à cause principalement du climat moins chaud et plus froid que les zones désertiques ou du sud comme dans la ville de Dubaï et du Caire ou leurs intérêts ont déjà été prouvés avec des réductions d'énergie de presque 20% (Figure32) pour le modèle EN15251, ou encore dans les grandes régions des Etats Unis en particulier dans le sud ou des économies considérables sont possibles alors qu'en parallèle cela reste négligeable et marginale dans les zones du nord tel que la Nouvelle-Angleterre ainsi qu'au nord du pacifique ou le climat est bien plus froid (De Dear & Brager, 2002). Cependant, si on essaye de voir cela plus globalement et d'un point de vue du cout de

façon générale sans se focaliser sur la consommation énergétique induite par l'utilisation de tel ou tel modèle de confort, l'équation peut être intéressante car en plus des économies de fonctionnement et d'exploitation faites par les modèles adaptatifs et qui suivent étroitement la réduction de la consommation énergétique même si cette dernière n'est pas très perceptible et importante comme l'atteste Henze & al. (2007), d'autres économies peuvent s'ajouter rendant leurs adoptions plus justifiées, plus intéressantes et plus rentables à moyen et à long terme, le coût de l'équipement pour le refroidissement par exemple en le réduisant, les économies peuvent être conséquentes, l'entretien de ces appareils et des lors moins important voir quasi inexistant avec l'utilisation exclusive de moyens passifs, ce qui au final donne au choix du modèle de confort une dimension plus grande et une influence capitale sur la durabilité du bâtiment.

3. Liberté d'action

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet de l'application des différents modèles de confort sur la consommation énergétique dans différentes régions représentatives du climat chaud et de sélectionner le modèle qui nous permettra une plus grande économie d'énergie. Dans ce contexte, on prouve via ce travail l'importance du choix du modèle de confort et son impact sur les performances énergétiques, les modèles adaptatifs sont eux plus efficaces et plus économes diminuant notre dépendance à l'égard des systèmes de refroidissement mécaniques qui sont énergivores dans les bâtiments de bureaux, cela grâce notamment à la flexibilité de leurs seuils de températures de confort intérieure qui varient en fonction des températures extérieures nous permettant de faire des économies atteignant presque les 20% dans certains cas comme démontré dans la partie précédente (section V.2), néanmoins ces performances ne sont pas spécifiques qu'aux immeubles de bureaux ou aux équipements publics et privés mais cette analyse est aussi applicable pour des bâtiments résidentiels.

On trouve plusieurs cas dans la littérature scientifique qui concluent leurs travaux par les mêmes théories que les nôtres pour des bâtiments résidentiels et affirment qu'appliquer un modèle de confort adaptatif pour gérer le confort intérieur des occupants passe par une économie en énergie et une plus grande efficacité de l'entité étudiée, cependant et ce qui a attiré notre attention est que le bénéfice apporté dans la plupart des cas est bien plus grand que celui observé dans notre travail comme par exemple dans l'étude de Attia & Carlucci (2015), ce qui nous a poussé à essayer de comprendre la cause de cette différence.

Attia & Carlucci (2015) ont réalisé une étude afin de comparer l'effet énergétique de l'adoption des modèles de confort dans des bâtiments résidentiels typiques et cela dans une zone climatique similaire à la notre (aride et désertique) et plus précisément au Caire, même si leurs résultats sont comparables aux notres, ce qui veut dire que le modèle ISO 7730 a été dans le bâtiment résidentiel plus énergivore que les modèles adaptatifs, le gain annuel apporté par ces modèles atteint les 25% dans le cas de l'application du modèle bioclimatique de Givoni alors que dans notre étude et pour les mêmes données climatiques à savoir ceux de la ville du Caire et le même modèle de confort à savoir celui de Givoni, le gain été seulement de 15.56% .

Le bâtiment bien évidemment joue un rôle dans cet écart ainsi que le rendement énergétique des équipements utilisés pour assurer la production de froid et du chaud, les paramètres introduits diffèrent légèrement dans cette étude par rapport à la notre, la performance du vitrage, l'isolation des parois et murs extérieurs est plus exigeante et importante passant d'un $U = 0.69 \text{ W/m}^2.\text{K}$ dans notre cas à $0.4 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ou encore le taux d'infiltration qui est moins important et procure au bâtiment résidentiel testé une plus grande étanchéité, ainsi les échanges thermiques entre l'ambiance et l'environnement adjacent extérieur sont moins élevés ce qui impacte la consommation globale, s'ajoutant à cela les apports de chaleur du d'une part aux gains internes qui diffèrent entre les deux cas et d'autre part à l'ensoleillement , même si ce dernier est de même intensité vu qu'on se situe dans la même ville et dans la même zone climatique, le pourcentage de vitrage en façade et son orientation varient faisant modifier de la même façon les apports solaires, on passe d'un WWR de 40% à 20% dans l'étude de Attia & Carlucci (2015), enfin le taux de ventilation joue aussi un rôle dans les déperditions de manière générale et plus particulièrement dans ce cas vu qu'il est lui aussi différent entre les deux études.

Toutes ces différences font varier logiquement la consommation globale de demande d'énergie entre les deux cas pour assurer le bien être des occupants mais ils ne peuvent pas à elles seules contribuer à une différence aussi importante qui dépasse les 10%. La deuxième explication est dans la durée d'utilisation du modèle, pour les immeubles de bureaux le confort doit être assuré pendant les heures de travail à savoir et en règle générale entre 8h et 18h ce qui revient à dire que la demande principale en énergie s'effectue dans un intervalle de 10h par jour et cela que 5 jours par semaine, les weekend et période de vacances ne sont pas pris en compte car les systèmes sont à l'arrêt et les locaux inoccupés alors que dans le même temps et dans les bâtiments résidentiels, le confort doit être assuré en journée comme en soirée et donc les systèmes de climatisation et de chauffage fonctionnent 24h /24 toute la semaine ce qui accroît logiquement la consommation énergétique du modèle de Fanger dans les bâtiments résidentiels par rapport à ceux des

bureaux creusant un peu plus l'écart entre ce dernier et celui de Givoni, ce qui agit au final sur le gain potentiel d'énergie d'où la différence entre les deux études.

S'ajoutant à ces aspects physiques et techniques, un autre élément nous paraît très important et primordial à invoquer qui est celui de l'interaction de l'occupant avec son environnement immédiat pour garantir son confort qui varie dans les deux études mises en parallèle, la notre et celle d'Attia & Carlucci (2015). En effet, dans la majorité des immeubles de bureaux existant, l'interaction de l'occupant avec son environnement est quasi nul et même dans les situations où cela est possible, cette interaction reste limitée et généralement réduite à la seule possibilité d'ouvrir les fenêtres, l'occupant dans ce cas peut gérer de façon partielle son ambiance pour essayer de minimiser l'inconfort, le reste est pris en charge en général par des systèmes mécaniques et électroniques ou plus encore les systèmes passifs utilisés afin de garantir le confort peuvent être fixes sans aucun moyen d'adaptation ou de réglage alors que dans le même temps dans les bâtiments résidentiels, l'occupant a un contrôle direct et absolu sur son environnement qui lui permet de pousser le phénomène d'adaptation et de contrôle avec ce dernier à ses limites extrêmes car il est dans la capacité d'appliquer toute forme d'adaptation comme par exemple changer l'activité, changer son habillement et faire varier son taux sans aucune restriction grâce à l'absence de code vestimentaire à l'intérieur des habitations contrairement aux locaux de bureau où une certaine forme de restriction est d'usage, boire des boissons froides ou chaudes ou encore faire une sieste, ce qui lui confère une gamme très large d'options d'ajustement en comparaison avec les occupants des immeubles de bureaux (Peeters & al., 2009).

L'accumulation et l'interaction de tout ces aspects (Figure 33) qui ont été décrite et qui sont d'un côté présente de façon totales et complètes dans les bâtiments résidentiels et de l'autre absentes ou bien dans les meilleurs des cas existent mais de façon partielle dans les bâtiments de bureaux font varier l'efficacité du modèle adaptatif entre les deux cas par rapport au modèle analytique de Fanger introduit dans la norme ISO7730 diminuant ainsi les besoins d'énergie tout en maintenant les exigences de confort intérieur dans des zones acceptables.

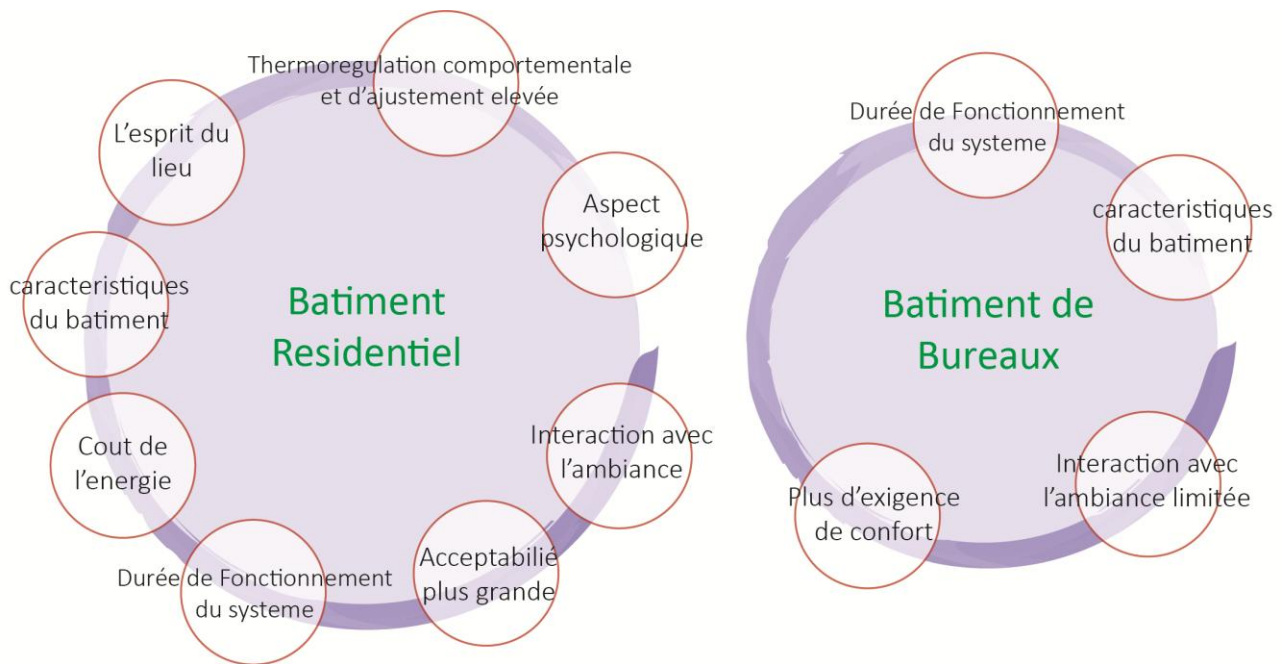


Figure 33 : Eléments principaux influençant la consommation énergétique dans les bâtiments de bureaux et résidentiels.

Notons que l'aspect psychologique joue un rôle tout autant important dans ce gain supplémentaire d'énergie et dans la sensation de confort qu'on peut éprouver dans les bâtiments résidentiels à cause notamment du sentiment de maîtrise de notre environnement intérieur qu'on peut percevoir dans notre propre maison contrairement à celui qu'on peut avoir dans un bureau ce qui nous permet d'élargir notre gamme de température de confort, cet aspect psychologique en plus qu'il soit lié au sentiment de maîtrise il est aussi en relation avec le lieu en lui-même, les locaux de travail épurés, austères avec peu de mobilier affectent notre perception et notre ressenti du confort en le dégradant alors qu'une habitation plus chaleureuse avec la présence de meubles, tapis et autres équipements nous confère tel un cocon une perception plus chaude du lieu qui fait diminuer au final la consommation de chauffage en hiver par exemple comme l'a pu le démontrer Oseland (1995) via son travail, il affirme que pour une même température dans des environnements différents à savoir de bureau et résidentiel (dans des habitations), les personnes testées et qui ont pu faire cette expérience avaient respectivement plus froids et plus chauds, la température opérative admise comme une température de confort était de

21.8°C pour le bureau et 20.4°C pour la maison ce qui accroît la consommation annuelle globale pour les immeubles de bureaux.

Toujours en relation avec cet aspect psychologique dans notre perception du confort, le coût de l'énergie est aussi un moyen de réduire la consommation et d'expliquer cet écart entre l'étude de Attia & Carlucci (2015) et la notre, dans un immeuble de bureaux l'occupant ne se soucie pas de l'aspect financier que pourrait avoir sa consommation d'énergie pour assurer son confort ce qui lui réduit de façon psychologique sa bande de température de confort, il devient ainsi plus stricte et plus exigeant envers l'environnement dans lequel il évolue augmentant la consommation globale alors que la même personne sera plus ouverte à une plus large gamme de températures de confort dans sa propre habitation afin d'essayer de réduire sa consommation et sa facture à la fin du mois, ce qui lui confère de façon inconsciente une acceptabilité plus grande de températures plus élevées ou plus basses, cela ajoute un autre point et une autre explication à l'écart établi et constaté entre les deux études.

Au final, on voit bien qu'il existe beaucoup de paramètres de natures divers et variés sur lesquels on peut intervenir afin d'avoir des bâtiments efficaces énergétiquement, de plus en plus performants et de moins en moins énergivores sans altérer le confort des occupants.

4. Acceptabilité des modèles adaptatifs

Les scénarios mis en place tout le long de notre étude nous ont prouvé l'efficacité des modèles adaptatifs dans leurs ensembles dans les zones climatiques chaudes et arides afin de garantir un confort acceptable tout en réduisant les besoins en énergie, cela est valable pour le modèle américain ASHRAE55, européen EN15251 ou encore le modèle bioclimatique de Givoni, néanmoins chaque modèle adaptatif a sa spécificité et diffère en terme de performance comme le démontre la Figure 34 qui représente les besoins de refroidissement des différentes régions. On a constaté que dans toutes ces villes où la simulation a été faite (Alger, Le Caire, Palerme et Dubaï) le modèle adaptatif européen EN15251 a toujours été plus performant que le modèle américain ASHRAE55 et cela avec les mêmes données climatiques et le même bâtiment de référence à chaque fois, dans la ville d'Alger par exemple la consommation pour le refroidissement est pour la norme EN15251 et la norme ASHRAE 55 respectivement de 99.75 kWh/m²/an et de 104.38 kWh/m²/an, cette tendance est la même pour la ville de Palerme, du Caire ou encore Dubaï où cela représente 113.63 kWh/m²/an et grimpe à 123.51 kWh/m²/an si on applique la norme ASHRAE 55.

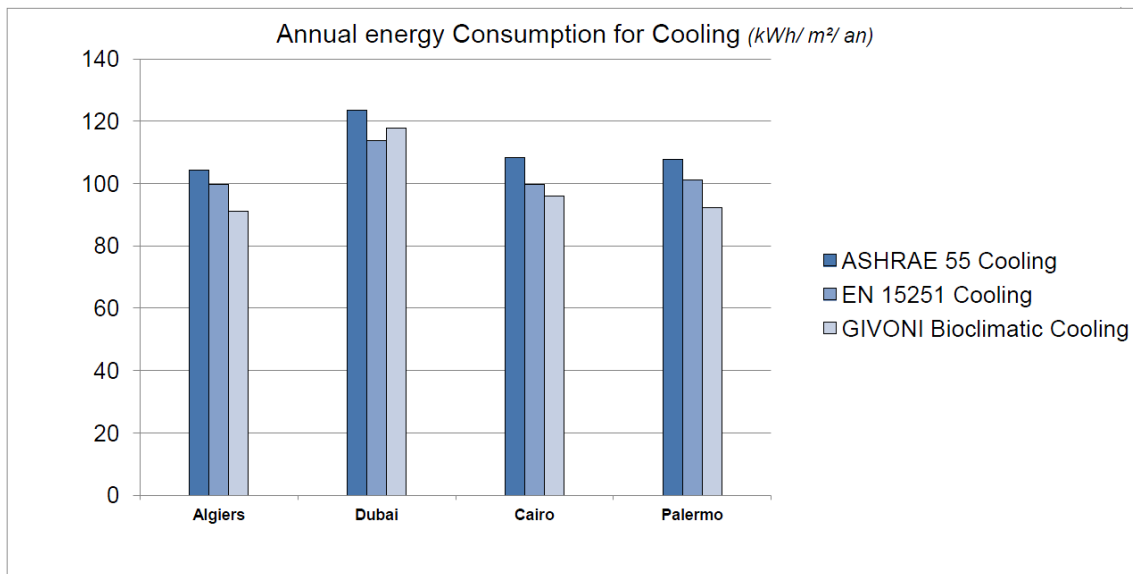


Figure 34 : La consommation annuelle d'énergie pour le refroidissement des différents modèles adaptatif.

La cause de cet écart entre les modèles adaptatifs et plus particulièrement entre la norme EN15251 et ASHRAE55 est du principalement à leur relation avec les températures extérieures, on sait que les modèles adaptatifs règlent et adaptent leur limite de gamme de température de confort en fonction de l'évolution du climat extérieur et plus précisément en fonction de l'évolution des températures, plus elles augmentent à l'extérieur plus la limite du confort à l'intérieur est élevée, dans ce cas deux questions fondamentales sont soulevées :

- la première déjà formulée, est comment explique t'on l'écart décrit ci-dessus entre la norme EN15251 et ASHRAE55 alors qu'ils évoluent en fonction de la même température extérieure.
- La seconde est la limite d'adaptation de l'occupant et son acceptabilité de températures du confort adaptatif de plus en plus élevées surtout dans les climats désertiques et arides étudiés.

Même si le modèle européen et américain utilisent les mêmes données climatiques et pour répondre à la première question, cela reste différent car leur définition de la température de référence n'est pas la même ce qui explique l'écart dans les résultats. En effet et si on prend le cas de la norme américaine ASHRAE55, la température prise en compte pour le calcul des températures opératives est une température moyenne mensuelle et donc qui s'étale sur les

30 ou 31 jours du mois en question, ce qui se répercute sur les seuils de confort intérieur et les fait varier par tranche mensuelle, alors que si on se penche sur la norme EN15251, on remarque que la définition de la température de référence est différente et est plus complexe que la simple moyenne mensuelle proposée par la norme ASHRAE55, elle se base sur une moyenne de température journalière glissante pondérée T_{rm} expliquée dans la première partie de ce mémoire (section II.1.5.c) ce qui modifie en temps réel et de façon journalière la gamme de température de confort pour ce modèle (EN15251). La conséquence de cela est que le modèle adaptatif européen est plus sensible aux variations de températures extérieures que celui de la norme américaine lui conférant plus de précision d'ajustement des températures intérieures et donc une plus grande efficacité énergétique ce qui se répercute et se constate sur la consommation globale d'énergie en une plus grande performance.

Pour apporter une réponse à la deuxième question, il faut savoir que dans les résultats de notre étude et en utilisant les différents modèles adaptatifs dans ces climats chauds de type désertiques et arides, on a pu constater des températures de fonctionnement intérieures élevées et dans certains cas des pointes dépassant les 30°C dans les mois les plus chauds et à certaines heures critiques de la journée comme par exemple dans la ville de Dubaï en appliquant le modèle de Givoni. Ces seuils extrêmes qu'on a pu extraire de nos différentes simulations nous ont poussé à remettre en question ces modèles adaptatifs et jusqu'où ces gammes peuvent aller sans affecter le confort réel des occupants et dans le même temps s'interroger sur la capacité de l'occupant à évoluer et à accepter ce genre de températures considérées comme insupportables ou à la limite de l'acceptable. Le principe d'acclimations et d'acceptabilité sont des données essentielles afin de répondre à cela car ils diffèrent bien évidemment selon le sexe et l'habitude qu'à l'occupant à supporter ce genre de températures.

L'exemple qui traduit ce phénomène d'adaptation et cette « *évolution changeante de l'environnement thermique en raison de l'évolution des perceptions* » (Peeters & al., 2009, p.774) est celui qui a été mené sur 50 sujets de la même région désertique qui est celle de l'oasis Libyenne de Ghadames et qui résident dans deux types d'habitations différentes, les premières anciennes et traditionnelles naturellement ventilées, les secondes contemporaines avec un dispositif de conditionnement d'air actif afin de gérer le confort intérieur des occupants, ce travail a été réalisé par Ealiwa & al. (2001) et démontre l'importance et l'intérêt de ces paramètres dans les modèles adaptatifs et dans la consommation d'énergie.

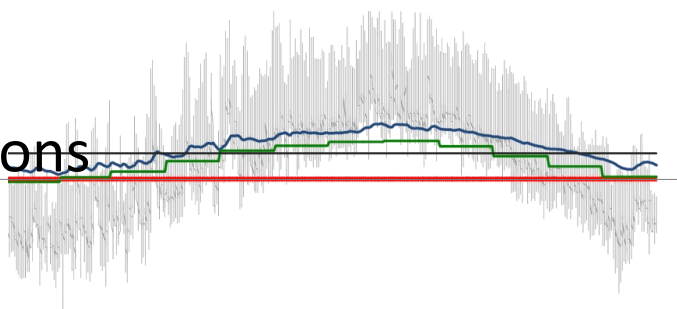
Cette étude révèle que ces deux échantillons réagissent et ressentent le confort de manière opposé et très contrasté car d'une part la sensation globale de confort et de satisfaction à l'égard de leur environnement intérieur est différente, les personnes résidant dans des

maisons anciennes traditionnelles sont plus satisfaites que celles résidant dans des habitations contemporaines et cela en période estivale, d'autre part 62% des occupants de maisons typiques de la région ne veulent pas changer leur environnement contre seulement 41% des personnes habitant dans de nouvelles constructions. De plus et ce qui est le plus important est que paradoxalement les plus satisfaits de leur climat intérieur à savoir les personnes à habitat traditionnel évoluent dans un intervalle de température intérieur de 30°C à 35°C, supérieur et nettement plus élevé que le second échantillon testé qui évolue dans des températures allant de 25°C à 31°C maximum et qui je le rappelle est le moins satisfait de son ambiance intérieur.

Ces différences de sensation se basent en réalité sur l'aspect psychologique de façon inconsciente et sur des paramètres socioculturelles telle que l'expérience thermique personnelle et passée appelé par De Dear (2004) la relativité perspective et sur le principe d'accoutumance et d'acclimatation qui influence la perception du confort, ainsi l'acceptabilité des occupants et leur seuil de tolérance aux températures élevées varient, elles peuvent être considérées comme acceptables par certaines personnes qui ont une capacité d'acclimatation développée grâce notamment aux stimulations environnementales répétées qui atténuent graduellement leurs réponses corporelles et humaines (Van Hoof & Hensen, 2007), comme elles peuvent être jugées insupportables par d'autres qui sont habitués à des températures plus basses comme ceux des maisons contemporaines dans le cas analysé qui évoluent dans un environnement climatisé d'où l'interrogation qu'on peut avoir sur l'influence de ces systèmes de climatisation sur notre capacité d'acclimatation et d'accoutumance.

De Dear & al. (1997) confirment dans leurs travaux nos analyses développées précédemment et répondent à cette dernière interrogation en démontrant que les occupants des bâtiments naturellement conditionnés ont une capacité d'adaptation plus grande et se montrent plus actifs dans l'adaptation et dans l'acclimatation de leur corps avec la température ambiante contrairement aux personnes qui évoluent dans des environnements clos, scellés, climatisés qui sont deux fois plus sensibles aux variations et aux fluctuations des températures intérieures, ils ajoutent que ces personnes deviennent donc en raccord avec les gammes étroites de températures de confort que leur offrent les systèmes mécaniques de climatisation et les rendent de cette manière plus sensibles et attentifs thermiquement.

Conclusion-Limitations



VI- Conclusion – Limitations

A travers ce mémoire, nous avons mis en œuvre une méthodologie afin d'essayer de répondre à notre problématique de départ et pouvoir faire un parallèle et un lien entre les différents modèles de confort et la consommation énergétique et cela dans des environnements qui étaient peu explorés et à peine étudiés, on pense au climat chaud avec ses spécificités et ses différentes caractéristiques, que ce soit celui concernant le bassin méditerranéen ou celui concernant les parties désertiques et arides du globe tel qu'ils existent dans les pays du golf, du moyen orient ou encore du désert africain.

Ce travail est fondamental pour identifier la meilleure combinaison afin de réduire la consommation d'énergie et pouvoir ainsi atteindre des bâtiments NZEB, notre volonté en tant qu'architecte et ingénieur n'est pas d'imposer un choix ni une idéologie mais au contraire de s'interroger sur la meilleure façon de se détacher de la dépendance énergétique en garantissant dans le même temps le confort des occupants et des utilisateurs de nos bâtiments que se soit dans les bureaux comme vue dans notre étude pour un meilleur bien être qui induit une plus grande productivité mais aussi en règle générale dans nos habitations et équipements publics ou privés, développer des pistes de réflexion dans ce sens et essayer au final d'intégrer dès la phase de conception des éléments constructifs et une plus grande attention sur à la fois le confort et les besoins en énergie.

En choisissant un modèle de confort tel que celui de Fanger, on expose notre bâtiment à une consommation d'énergie excessive et plus importante à cause des seuils de confort étroits et strictes prescrits par ce dernier qui sont détachés de toute réalité extérieure et de toute variation du climat ce qui représente une des limites de ce modèle qui est la non négociabilité, l'environnement scellé conditionné avec des systèmes de refroidissement d'air détériorent notre capacité d'adaptation et accroissent notre sensibilité aux fluctuations des températures nous rendant plus exigeant envers notre environnement thermique et nous infligeant en plus un écart de températures entre l'ambiance et le climat extérieur très important qui peut être inconfortable et insupportable pour les personnes, contrairement aux modèles adaptatifs dans leur ensemble introduit dans les différentes normes internationales ou l'occupant devient plus flexible en s'appuyant sur ces capacités humaines et corporelles pour s'adapter à un environnement plus chaud et interagir avec lui en toute liberté afin d'assurer son confort.

Cette flexibilité et adaptabilité nous permet de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 20% dans notre étude augmentant ainsi les performances et l'efficacité de notre bâtiment quel que soit le contexte ou il s'inscrit.

On peut encore pousser ces performances et les voir augmenter par l'adoption de différents dispositifs conceptuels ou techniques tel qu'un vitrage plus performant, une meilleure isolation, des systèmes d'ombrages plus intelligents et plus adéquats... ect et gagner ainsi en efficacité en minimisant encore davantage les besoins d'énergie, cela nous procurera la possibilité d'assurer qu'avec des moyens naturels et passifs le confort des occupants dans les climats chauds de type méditerranéen sans recourir au système actif de refroidissement (Pagliano & Zangheri, 2010).

Cependant, cela reste difficile à réaliser dans des climats encore plus chauds tel qu'à Dubaï ou au Caire où les températures sont très élevées s'étalant sur des durées très longues et continues, même si l'effet de l'adaptabilité peut minimiser l'impact de ces températures extrêmes, l'utilisation de systèmes hybride et mixte ou au final deux systèmes de gestion de confort sont couplés dans une même structure privilégieront un confort d'adaptation naturel ou à faible énergie réduisant les besoins au maximum (De Dear & Brager, 2002 ; Yang & al., 2014), en plus d'un système mécanique d'appoint garantissant le confort même en période de canicule et de forte chaleur et pouvoir ainsi prévenir les risques de surchauffe qui sont importants dans ces zones.

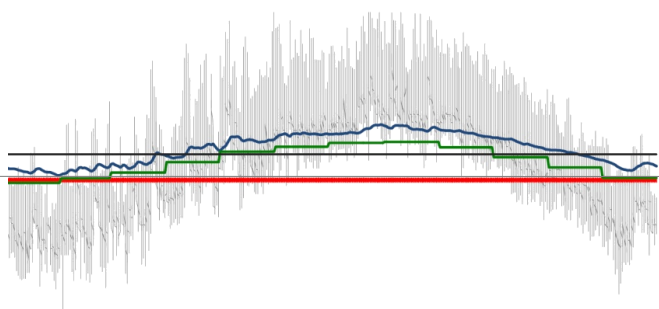
Nous avons la certitude après cette analyse que toutes ces différences entre les températures de confort et tout ces écarts en terme de besoin d'énergie entre les différents modèles seraient encore plus grands si on prenait en compte d'autres paramètres qui sortent du champ de cette étude tel que l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment qui n'a pas été prise en considération dans notre cas mais aussi d'autres données supplémentaires telle que la combinaison de divers orientations qui généreront encore plus d'hypothèses et donc de résultats, qui pourront être sujet des études antérieures.

Sans oublier l'aspect psychologique qui influe sur la perception du confort ou les seuils de tolérance aux températures différent d'individu à un autre, des études complémentaires menées sur terrain doivent être faites pour nous éclaircir sur ces seuils et sur l'acceptabilité par les occupants de températures de confort élevées.

Il est donc primordial de pousser la recherche encore plus loin en réalisant d'autres études sur le sujet du confort adaptatif surtout dans les climats classés comme chauds afin de répondre à nos différentes interrogations et trouver des pistes de réflexions et pouvoir au final affiner notre analyse en ayant de nouvelles données qui nous permettront de garantir

le confort des occupants avec une efficacité énergétique élevée et introduire dans le futur de nouvelles règles d'adaptation et de système de régulation du confort.

Bibliographie



Bibliographie

- ANSI/ASHRAE 55. (2010). Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- Attia, S., Carlucci, S. (2015). Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, 102, 117-128.
- Attia, S., Hensen, J.L.M. (2014). Investigating the Impact of Different Thermal Comfort Models for Zero Energy Buildings in Hot Climates. In *Proceedings 1st International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates, ASHRAE, February 24-26, Doha, Qatar*.
- Bagnouls, F., Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. In : *Annales de Géographie*, Tome.66, 355, 193-220.
- Bigouret, A. (2012). Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysique cutanées. Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 1-388.
- Brager, G.S. (2006). Mixed-mode cooling. *ASHRAE Journal*, 48, 30-37.
- Brager, G.S., De Dear, R.J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27, 83-96.
- Cantin, B., Moujalled, B., Guarracino, G. (2005). Complexité du confort thermique dans les bâtiments. 6^{ème} Congrès Européen de Science des Systèmes, Paris, 1-10.
- CEN (Comité européen de normalisation). (2006). EN 15251 : Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. 1-52.
- Charles, K.E. (2003). Fanger's Thermal Comfort and Draught Models. NRC Publications Archive, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, RR-162, 1-31.
- De Dear, R.J. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor Air*, 14 (7), 32-39. Blackwell Munksgaard.

- De Dear, R.J., Brager, G.S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34, 549-561.
- De Dear, R.J., Brager, G.S., Cooper, D. (1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Final report ASHRAE RP-884. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Djongyang, N., Tchinda, R., Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2626-2640.
- Ealiwa, M.A., Taki, A.H., Howarth, A.T., Seden, M.R. (2001). An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya. *Building and Environment*, 36, 231-237.
- Enerdata intelligence & consulting. (2016). Enerdata intelligence & consulting, Global Energy Statistical Yearbook 2016, Total energy consumption. En ligne <https://yearbook.enerdata.net/energy-consumption-data.html>, consulté le 31 mars 2016.
- Eurostat. (2016). Eurostat Statistics Explained, consommation d'énergie. En ligne http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy/fr, consulté le 03 avril 2016.
- Ezzeldin, S., Rees, S.J. (2013). The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates. *Energy and Buildings*, 65, 368-381.
- Fanger, P.O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 30, 313-324.
- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort : Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: The Danish technical press.
- Fato, I., Martellotta, F., Chiancarella, C. (2004). Thermal comfort in the climatic conditions of Southern Italy. Preprint version of the paper published in ASHRAE Transactions, 110(2), 578-593.
- Friess, W.A., Rakhshan, K., Hendawi, T.A., Tajerzadeh, S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings*, 44, 26-32.
- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Baggio, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43, 1030-1037.

- Gaussen, H. (1955). Les climats analogues à l'échelle du monde. Comptes Rendus, Hebdomadaires des Sciences de l'Académie d'Agriculture de France, Paris, Vol.41.
- Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Edition du Moniteur.
- Gratia, E., Bruyère, I., De Herde, A. (2004). How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. Building and Environment, 39, 1157-1170.
- Halawa, E., Van Hoof, J. (2012). The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. Energy and Buildings, 51, 101-110.
- Hensen, J.L.M. (1991). On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. Proefschrift, Eindhoven: Technische universiteit Eindhoven, Nederland, 1-197.
- Henze, G.P., Pfafferott, J., Herkel, S., Felsmann, C. (2007). Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control. Energy and Buildings, 39, 221-235.
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments. Energy and Buildings, 34(6), 667-684.
- Knoch, K., Schulze, A. (1952). Methoden der Klimaklassifikation. Justus Perthes, Gotha.
- Mazari, M. (2012). Etude et évolution du confort thermique dans bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou). Mémoire de magister en architecture, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 1-167.
- Moujalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 1-330.
- Moujalled, B., Cantin, R., Guarracino, G. (2008). Comparison of thermal algorithms in naturally ventilated office buildings. Energy and Buildings, 40, 2215-2223.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. Energy and Buildings, 45, 11-17.
- Olesen, B.W., Parsons, K.C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. Energy and Buildings, 34, 537-548.
- Oseland, N.A. (1995). Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. Energy and Buildings, 23, 105-115.

-
- Pagliano, L., Zangheri, P. (2010). Comfort models and cooling of buildings in the Mediterranean climate. *Advances in Building Energy Research*, 4 (1), 167-200.
- Parsons, K. (2003). *Human thermal environment*. 2nd Edition. London: Taylor & Francis.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.
- Peeters, L., De Dear, R.J., Hensen, J.L.M., D'haeseleer, W. (2009). Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy*, 86, 772-780.
- Pfafferott, J.U., Herkel, S., Kalz, D. E., Zeuschner, A. (2007). Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria. *Energy and Buildings*, 39, 750-757.
- Skov, P. (1992). The Sick Building Syndrome. *Annals New York academy Of Sciences*, Vol.641 (1), 17-20.
- Sourbron, M., Helsen, L. (2011). Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings. *Energy and Buildings*, 43, 423-432.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., Van Den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201-215.
- Union européenne. (2016). Directive 2012/27/UE du parlement européen et du conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique. En ligne <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&qid=1464681982722&from=FR>, consulté le 02 mai 2016.
- Van Der Linden, K., Boerstra, A.C., Raue, A.K., Kurvers, S.R. (2002). Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, 34, 737-744.
- Van Hoof, J., Hensen, J.L.M. (2007). Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Building and Environment*, 42, 156-170.
- Yang, L., Yan, H., Lam, J.C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*, 115, 164-173.

Table des Illustrations

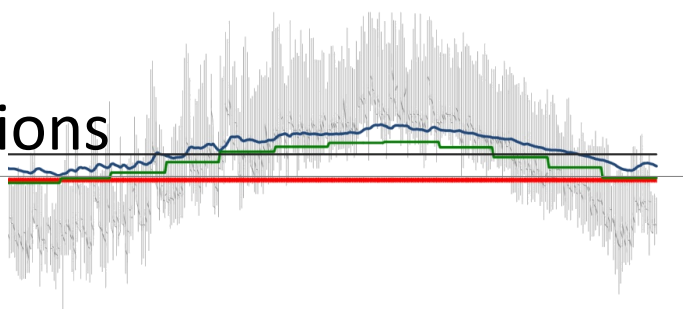


Table des illustrations

1. Figures

Figure 1 : Consommation énergétique mondiale (Enerdata, 2016).....	9
Figure 2 : Consommation totale d'énergie par secteur d'activité de l'UE-28, 2013-basé sur Mtoe (Eurostat, 2016).....	10
Figure 3 : Gradient de température dans un environnement froid, et chaud. Etude de Wanger (cité par Bigouret, 2012, p.44).....	17
Figure 4 : Schéma de la thermorégulation autonome et Comportementale (Djongyang & al., 2010, p.2633).....	18
Figure 5: Echelle de sensation et d'évaluation thermique PMV d'ASHRAE (Charles, 2003, p.7).....	23
Figure 6 : Représentation PPD en rapport avec le PMV d'après la norme ISO 7730 (Djongyang & al., 2010, p.2629).....	24
Figure 7 : Zone de confort thermique suivant le taux d'humidité et la température opérative (Taleghani & al., 2013, p.208).....	24
Figure 8 : Distribution géographique des bâtiments étudiés servant de base pour le modèle adaptatif (De Dear & Brager, 2002, p.551).....	25
Figure 9 : Estimation du confort statique/ adaptative pour les bâtiments climatisés (a) et ventilés naturellement (b) (De Dear & Brager, 2002, p.552).....	26
Figure 10 : Plage de Températures de confort intérieur en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle (Attia & Carlucci, 2015, p.120).....	30
Figure 11 : Plage de Températures de confort intérieur en fonction de la température extérieure journalière glissante pondéré suivant les différentes catégories établie par la norme EN15251 (Attia & Carlucci, 2015, p.122).....	33
Figure 12 : Diagramme psychrométrique de Givoni (Attia & Carlucci, 2015, p.123).....	35

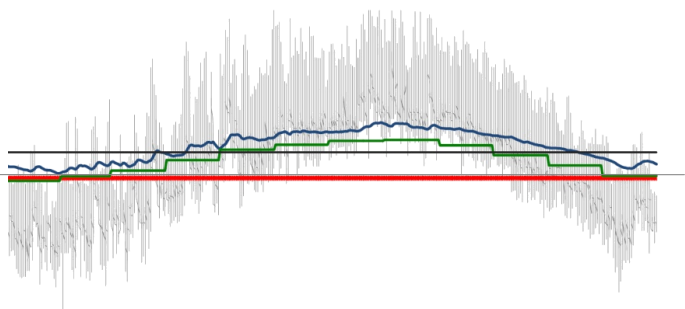
Figure 13 : Schéma explicatif du Protocole général de l'étude.....	48
Figure 14 : 3D et caractéristiques géométriques du modèle (Gratia & al., 2004, p.1159).....	50
Figure 15 : Composition de la toiture (a) et des parois extérieures (b)	51
Figure 16 : Classification climatique de Koppen- Geiger (Peel & al., 2007, p.1642)	55
Figure 17 : Situation géographique du Caire.....	58
Figure 18 : Distribution des moyennes de températures et de précipitations pour le Caire...	58
Figure 19 : Situation géographique de Palerme.....	59
Figure 20 : Distribution des moyennes de températures et de précipitations pour Palerme..	59
Figure 21 : Situation géographique d'Alger.....	60
Figure 22 : Distribution des moyennes de températures et de précipitations pour Alger.....	60
Figure 23 : Situation géographique de Dubaï.....	61
Figure 24 : Distribution des températures et des précipitations pour Dubaï.....	61
Figure 25 : Distribution des températures des modèles de confort et des températures extérieures.....	67
Figure 26 : Consommation mensuelle d'énergie pour le chauffage et le refroidissement.....	73
Figure 27 : Stratégie du chaud.....	76
Figure 28 : Stratégie du froid.....	79
Figure 29 : Emplacement des poutres froides dans les locaux de bureaux et boucle convective.....	80
Figure 30 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et le refroidissement.....	81
Figure 31 : Flexibilité des seuils de températures entre le modèle analytique et le modèle adaptatif et gain énergétique (variation des écarts de températures).....	82
Figure 32 : Pourcentage d'énergie conservée pour le refroidissement par les modèles adaptatifs par rapport au modèle de Fanger (ISO7730).....	85
Figure 33 : Eléments principaux influençant la consommation énergétique dans les bâtiments de bureaux et résidentiels.....	93

Figure 34 : La consommation annuelle d'énergie pour le refroidissement des différents modèles adaptatif.....	95
--	----

2. Tableaux

Tableau 1 : Valeur de l'activité métabolique « met » suivant différentes taches.....	21
Tableau 2 : Températures opératives recommandées basées sur la norme ISO7730 (Taleghani & al., 2013, p.203).....	28
Tableau 3 : Estimation du pourcentage PPD et l'intervalle PMV pour les 3 catégories suivant le confort général et l'inconfort local (Olesen & Parsons, 2002, p.542).....	29
Tableau 4 : Les différents algorithmes du confort adaptatif pour chaque pays étudié (Taleghani & al., 2013, p.209).....	31
Tableau 5 : Définition des différentes catégories et leur plage de température acceptable en fonction de la température de confort optimal (Taleghani & al., 2013, p.210).....	33
Tableau 6 : Consommation d'énergie en (kWh/m ²) et par rapport à ISO7730 (%) pour le chauffage et le refroidissement pour les 02 zones orientées nord et sud (Sourbron & Helsen, 2015, p.....	38
Tableau 7 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et le refroidissement suivant les différents modèles de confort (Attia & Carlucci, 2015, p.125).....	39
Tableau 8 : Revue des études traitant des modèles de confort et des besoins d'énergie.....	41
Tableau 9 : Caractéristiques du modèle de référence.....	52
Tableau 10 : Description des lettres définissant les différents climats (Peel & al., 2007, p.1636).....	56
Tableau 11 : Données géographiques et démographiques de la ville du Caire.....	58
Tableau 12 : Données géographiques et démographiques de la ville de Palerme.....	59
Tableau 13 : Données géographiques et démographiques de la ville d'Alger	60
Tableau 14 : Données géographiques et démographiques de la ville de Dubaï.....	61
Tableau 10 : Consommation énergétique suivant la composition des murs extérieurs (Friess & al., 2012, p.31).....	77

Annexes



Annexes

Annexe 01: « Thermal comforts models for net zero energy buildings in hot climates. »

Article accepté, publié et sera présenté lors de la « Second International Conference on energy and Indoor Environment for Hot Climates », February 26- 27, 2017, Doha, Qatar, organisée par ASHRAE organisation US.

Annexe 02: Evolution mensuelle de l'humidité relative ainsi que les besoins en électricité et en gaz dans le bâtiment suivant les différents modèles de confort et dans les différentes villes.

- **Annexe 02-a :** Alger
- **Annexe 02-b :** Le Caire
- **Annexe 02-c :** Palerme
- **Annexe 02-d :** Dubaï

Annexe 01:

Thermal comforts models for net zero energy buildings in hot climates

Hamza Belkhouane
ULG Student

Jan Hensen, Ph.D.
Fellow ASHRAE

Shady Attia, Ph.D.
ASHRAE Member

ABSTRACT

Several energy efficiency concepts and comfort models emerged in the last 15 years seeking high performance buildings and optimal occupant comfort conditions. The aim of high performance buildings is to reduce the carbon footprint and energy consumption of buildings while maintain a fit to purpose comfort. In this context, this work raises the question of fit to purpose comfort models that can from one side reduce the energy consumption of typical office buildings in hot climates (cooling dominated) while on the other side ensuring indoor thermal comfort. Indeed, studies that address energy efficiency are many, however it is in most cases applied to temperate or cold climates and barely explored for hot climates. The objective of this paper is to (1) combine several comfort models for a net zero energy building in hot climates, (2) select the comfort model that shows the optimal comfort quality of indoor environment and (3) compare the building's annual energy consumption for each used comfort model. To respond to our research problems, a methodology has been established, which goes through several phases. First identifying the different comfort models comfortable to use in hot climates (ISO 7730 / EN 15251 / adaptive ASHRAE / Givoni), secondly selecting a typical validated office building model as a reference building and finally selecting representative cities in the Mediterranean arid and hot climate (Algiers / Sicily / Cairo / Dubai). The study used building performance simulation to generate the different results on the energy consumption and the operative temperatures of the different models of comfort in each city. The paper ultimately identifies the fit to purpose comfort models for a medium size net zero energy office building in hot climates. The paper presents a comparison that can help building professional to identify the most appropriate comfort model that allows optimizing energy consumption, ensuring thermal comfort for robust performance of net zero energy buildings in hot climates.

Introduction

The question of thermal comfort in high performance buildings in hot climates is complicated because it takes into account not only objective factors but also subjective factors that affect human perception (Attia et al. 2015a). In literature, thermal comfort has been defined in many different ways,

the objective according to De Dear (2004) is to provide a healthy indoor climate ensuring the well being and not affecting the productivity of occupants. It is defined as "a condition in which there is no pulses to correct the environment through behavior." (Hensen, 1991), the occupant not preferring a warmer or colder environment and expressing its satisfaction for its thermal environment (Attia et al 2010 and 2012), we can deduce that the thermal comfort is considered like an equilibrium state or heat exchange between the human body and its environment. Givoni (1978) speaks of thermoregulatory mechanisms that are at a minimum level of activities. ASHRAE (2004) has similarly defined thermal comfort but it highlights the psychological aspect to achieve the feeling of comfort and defines it as primarily a state of mind, which adds a subjective parameter to the concept of comfort.

In the end, there is no unanimous and conventional manner to define thermal comfort. In this context, the earliest comfort models appeared in 1970s and has been integrated with the Fanger model in different standards such as ISO7730 standard and ASHRAE55 (Yao et al, 2009) to come next to the evolution of the construction one of the main pillars and condition in architectural design. Other approaches have been developed in order to increase performance of buildings based on adaptation and occupant interactions with their environment to ensure their comfort. These adaptive models incorporate in the American adaptive standard ASHRAE55 in 2004 and European adaptive standards EN15251 in 2007 (De Dear & Brager, 2002). However, all these standards and models were made on the basis of experimentation and study principally in temperate and cold climate, the question posed by this article is the applicability of these models and their validity for high performance buildings in hot climates. Their effectiveness and their contribution in order to reduce energy consumption in the office buildings and provide elements that will help us to attain the NZEOB target (Attia 2015b). Therefore, we set up the goal of a comparative analysis of different models of comfort in four representative cities of warm and hot climates (Mediterranean, Semi-Arid and Desert). This paper is a part of a Master's thesis in the field of architectural engineering at Liege University (Belkhouane 2017). The goals of the study are investigating the impact on energy consumption and demonstrate which model of comfort is more suitable to use in this type of climate for office building.

There are examples in the literature of studies on comfort models, but few studies are conducted in hot climates and even less on high performance office buildings (Indraganti et al. 2016 and Indraganti et al., 2014). Therefore, we selected a case study of an office building to conduct our study. We use field tested and calibrated simulation model we generated the study results, analyzed it and visualized it. The study is following a comparative approach comparing four cities to determine the best model of comfort and recommend the best technical design to be adopted to reduce energy needs and conserve at the same time the well-being of occupants inside. The paper is organized into five parts, a literature review, and methodology description of the experimental protocol and choice of case studies. The third part presents the results of the energy simulation and the fourth part provides an analysis and interpretation of results to deduce the various recommendations and determinate the most appropriate model of comfort for NZEBs in hot climates. We end this article with a conclusion that summarizes our study.

LITERATURE REVIEW

The first step of this study was to explore the similar key studies on thermal comfort models used in hot climates and their relationships with energy use intensity. Table 1 summarizes some studies similar to our case, which were explored and analyzed to extract a conclusion and possible limitation.

Table 1. Review of studies that deal with models of energy-comfort needs

	Article name	Authors	Remarks and observations
01	Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate	S.Attia, S.Carlucci	The article focuses residential buildings and uses only one case study in Cairo.
02	office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates	S.Ezzeldin, S.Rees	The study investigates the potential of operating air conditioning in a mixed mode strategy in hot climates without varying the comfort models thresholds.
03	Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings	B.Moujalled, R.Cantin, G.Guarracino	This is very interesting because it deals with the quality of the thermal comfort in buildings like offices in the mediterranean (east and south of France). However the energy consumption is not taken into account and the studied buildings are naturally ventilated.
04	Thermal comfort in the climatic conditions of Southern Italy	I.Fato, F.Martellotta, C.Chiancarella	While the study addresses the case of naturally ventilated and air-conditioned public buildings, it focuses on comfort models comparison and does not explore their relationship with energy needs.
05	Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings	M.Sourbron, L.Helsen	The energy consumption for cooling is not related to the comfort models (a slight gain for the EN15251 standard) for office buildings. This study is done in a temperate European climate (Maastricht / Netherlands below) and therefore the findings do not apply to hot climates tackled by our study.
06	Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control	G.P. Henze, J.Pfafferott, S.Herkel, C.Felsmann	The study investigates the relationship of comfort models with power consumption and cost for commercial buildings, it is deduced that the adaptive models allow us a saving of the cooling load of 14 to 17% however, this applies to continental climates where the study was done (Freiburg- Germany)
07	Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria	J.U. Pfafferott, S.Herkel, D.E.Kalz, A.Zeuschner	Although the article focuses on the comfort of models in office, it remains restricted to the German context and therefore has a temperate/cold climate. However, this article demonstrates that adaptive models are more effective in temperate climatic conditions, but in periods of heat wave, a cooling system is required (Water-driven cooling systems)
08	Quantifying the relevance of adaptive comfort models in moderate thermal climate zones	J.van Hoof, J.L.M.Hensen	In temperate maritime climate, comfort models allow only reducing energy requirements in buildings that are naturally ventilated but there is an increase in consumption for buildings with centralized HVAC system.

Based on the review presented in Table 1 we can state that studies on comfort models are many and varied, though they mainly focus on temperate and cold climates and do not address at the same time comfort and energy consumption in high performance office buildings. Also the majority of the listed studies represented single cases and therefore is not representative and can not be used in hot climates.

METHODOLOGY

In the following section, we will discuss our case study is to describe the experimental protocol used. A reference building was chosen and modeled on the DesignBuilder thermal simulation software in order

The simulation of the energy performance of the building was carried out by EnergyPlus software to analyze the impact of different models of comfort on energy consumption of our office building in different contexts and thus evaluate these needs for heating and cooling. Table 2 summarizes the basic characteristics of our model that was encoded in the software in compliance with ASHRAE90.1 2013. The data input was followed by several simulations and calibration measures to create reliable thermal analysis and generate monthly energy consumption for cooling, the operative temperatures and the variation of the relative humidity for each model and for each selected city.

Properties		Model characteristics		
01	shape	Rectangular	11 Occupation (density)	0.1058 peop/m ²
			12 Occupancy	From 8:00 to 18: 00 except W.E and Holidays
			13 Planning	10W/m ² (appliances), 10.50W/m ² (lighting at 300lux)
02	Orientation	Nord/sud (0°)	14 Relative humidity	40%<HR<60%
03	Dimension	67m*15m	15 Heating Systeme	gas condensing
04	Number of Levels	05	16 Cooling Systeme	CAV, air coller chiller/COP 3.5
05	Floor height	3.60m	17 Ventilation Systeme	active mechanical
06	U.RDC	U= 0.54 W/m ² K	18 Clothing resistance	0.7clo in summer/1clo in winter
07	U Ext. Wall	U=0.69 W/m ² K	19 Metabolic activity	Sedentary 1met
08	U Roof	U= 0.22 W/m ² K	20 Air velocity	0.1m/s
09	U Window	U=1.98 W/m ² K	21 Thermal set point	10°C for heating /28°C for cooling
10	WWR	40%		

116

classification of Köppen well as ASHRAE. Köppen classification is based on precipitation and temperature, and is represented by three letters first defines the type of climate, the second is the rainfall and the third define the temperature variation.

Table 3. Climatic charactersits of the four cities

	ALGIERS	CAIRO	PALERMO	DUBAI
Population	2.988.145 inhab	20.439.541 inhab	1.275.598 inhab	2.489.630 inhab
Latitude	36.68° N	30.13° N	38.18° N	25.25° N
Altitude	28.95 m	74.06m	21.03 m	04.87 m
Köppen Classification/ASHRAE	C (Csa)/Zone 3	B (BWh)/Zone 2 (2b)	C (Csa)/Zone 3	B (BWh)/Zone 1

Table 3 represents the geographical coordinates of different cities chosen for our study and their size expressed in population and climate classification. Algiers and Palermo are classified in Zone 3 according to ASHRAE classification and in group C (Csa) as classified by Köppen. The climate in both cities is considered as temperate Mediterranean with rainy winter, hot and dry in summer with the warmest monthly mean temperature above 22 ° C. Cairo is classified in Zone 2 (2B) according to the classification ASHRAE. Dubai is classified in Zone 1, however these two cities are in the same group B (BWH) as classified by Köppen. The climate of Cairo considered as mixed dry and humid and climate of Dubai is considered, as extreme hot and humid with sandy storms.

Results

Figure 2 shows the temperature distribution after application of different comfort models selected and tested in four tested cities; this is juxtapositioned with climate data from each city represented by the outside temperatures. The purpose is to visualize the evolution of the temperature limits of comfort for each model, the American and European adaptive model, the Franger model and the Givoni bioclimatic model and determine the profile of these comfort models.

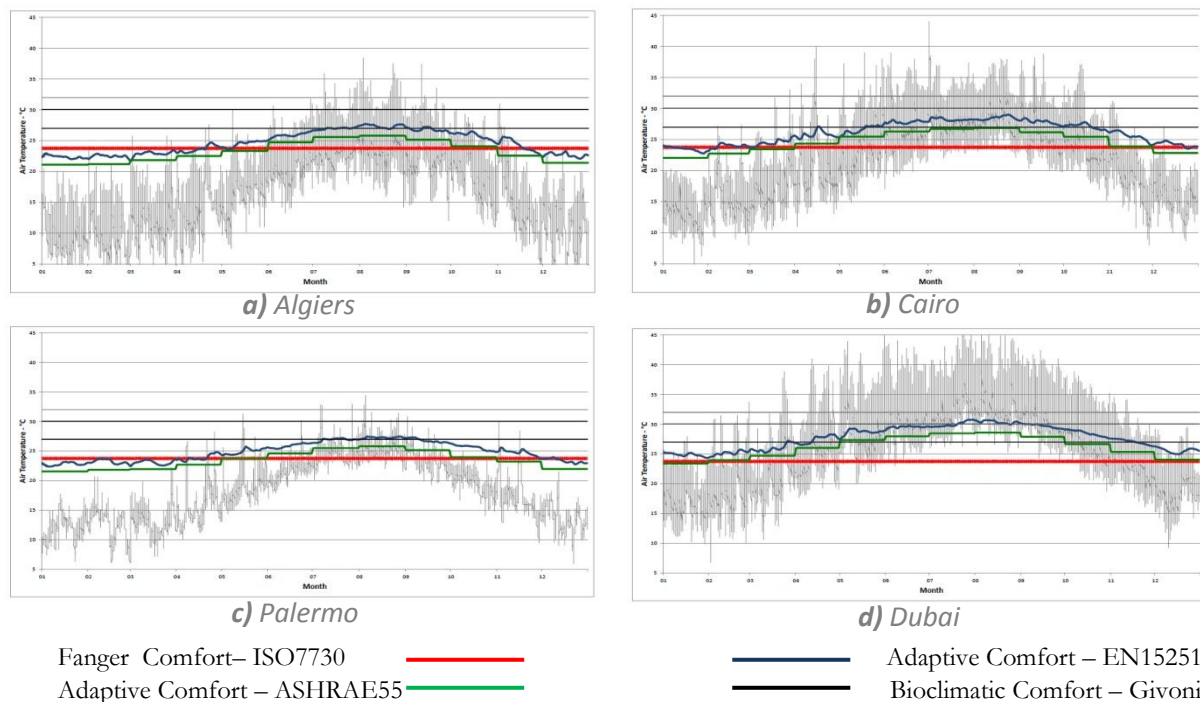


Figure 2 The distribution of temperatures of comfort models and outdoor temperatures

The temperature distribution in adaptive models including ASHRAE55 and EN15251 follow the curve of the climate data. The external temperatures moves together with the internal temperatures while Fanger's ISO7730 standard still retains the same narrow set temperature band regardless of the external temperature evolution. However, even if the trend line has the same distribution for the adaptive models and external temperature, this is not necessarily true in terms of the amplitude. Indeed, if we take the city of Palermo shown in Fig 2 (c), we note that there's a good match between the profiles but only in the warm period of the year that extends from July to October. For the rest of the year the match is very poor and almost nonexistent. This analysis is also valid for the city of Algiers shown in Fig. 2 (a), where the distribution of outdoor temperature match with the profile of the different adaptive comfort modeles during summer (from June to mid October), but dissociates them in the rest of the year. Dubai represented in Fig. 2 (d) is in a different logic, the profiles are matching well in the coldest period of the year from October to May, but unlike the case of Palermo or that of Algiers, the correlation is very small or not-existent during the very hot period (May to September) when there is a detachment of the curve outside temperatures with those of comfort models. Finally, Cairo represented in Fig. 2 (b), has the smallest gap between outdoor and adaptive comfort tresholds throughout the year.

Figure 3 shows the variation of annual requirements in heating and cooling energy of our office building in the different cities and the following four comfort models used. The variation of the energy consumption for cooling is significantly more important than that for heating which is very low. However heating needs are higher in the cities of Dubai and Cairo in comparison with the city of Palermo and Algiers, this trend is also true for the cooling requirements that can reach in Dubai 140kWh/m²/year then it does not exceed 91 kWh/m²/year for the city of Algiers following the chosen model for a NZEB.

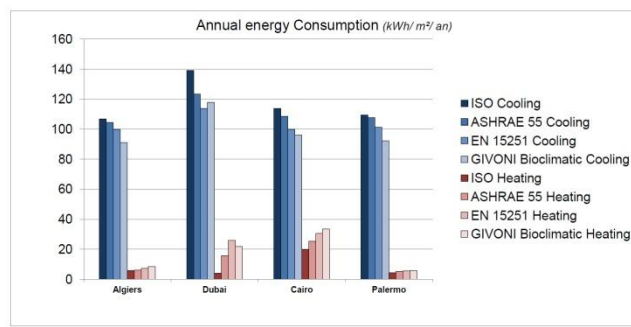


Figure 3 Annual energy consumption

These differences in energy demand are not only true when we compare the four cities, it is also true when we compare the comfort models for the same city as demonstrated in Fig. 4 which translates the monthly energy demand for heating and cooling in each city for each comfort model. We can find that peak power consumption for cooling in the summer period (July and August) for the cities of Algiers, Cairo and Palermo respectively shs own in Fig. 4a, b and c. However in the case of Dubai (Figure 4d), we see that it is developing a strong zone that extends from May to November with most important active cooling demand inducing consumption up to 14 kWh/m² in July. Moreover, the energy requirements for the Fanger model (ISO7730) are most important in comparison with adaptive models (ASHRAE55 / EN15251) in all cities during different months of the year.

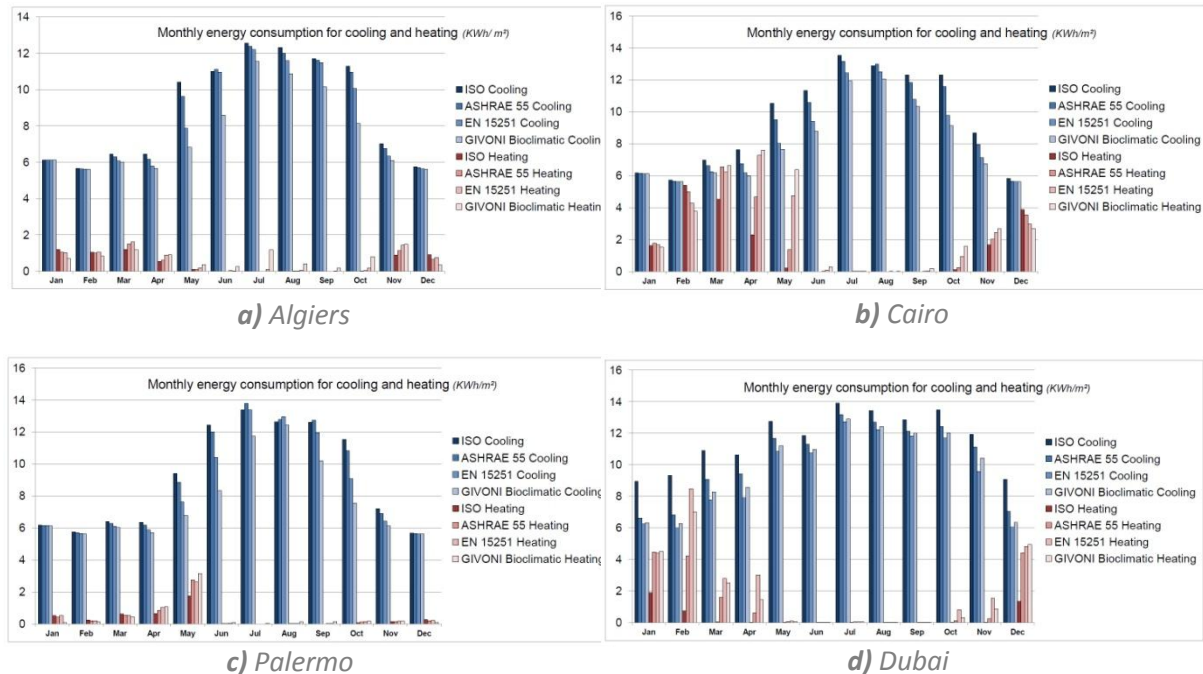


Figure 4 Monthly energy consumption for heating and cooling

Discussion

The different examples of Figure 3 show the complexity of choosing a comfort model to ensure a good and acceptable indoor environment because each case study is different involving a diversity of strategies used to reduce the energy needs, the temperatures profile of Algiers or even in Palermo differ from Dubai or Cairo. In the first case Figure 3 (a) - (c), there is a concordance between the profiles of comfort and the outside temperature in the summer period but it stands out in winter period. As a consequence we introduced a better insulation for external walls, a more efficient glazing and compact building with a very high airtightness to allow increasing efficiency and reducing the energy consumption while ensuring comfort in the winter. However, with these energy conservation measures, the office spaces got overheated in the summer period, therefore, we introduced a mixed mode operation system (Ezzeldin et al. 2013) using a passive cooling with natural ventilation in Algiers, Palermo Cairo. Also we integrated in the model an adjustable or movable shading system (louvres) to decrease the incidence and radiation of the sun, the opening orientation in facades, and all these measures can ultimately ensure a summer comfort with minimal active cooling system. The case of Dubai Figure 3d is quite different, indeed the outdoor profiles match well the comfort profiles during the winter period but not in the summer period and the temperatures are much higher than the profile of all comfort models. In this case, an active cooling strategy is needed to increase the energy efficiency of the building. We incorporated in the model a chilled beam system with a very air tight envelope and air locks while activating the internal thermal mass of floors. Active cooling system that will be used most of the year and with the use of heat exchanger any additional heating load should be compensated as a consequence of the good building insulation values.

The savings in terms of energy use intensity between different thermal comfort models varied for all case studies. For the city of Algiers is estimated that the saving can vary between 3% and 15%,

depending on the selected comfort model. Almost the same conditions apply to the city of Palermo where the savings vary from 2% to 16% following the adaptive model (EN15251). However, this percentage is more significant for the city of Cairo and it passes almost 5% up to 16% and becomes more significant if we look at figures for the city of Dubai, ranging from 12% to 19%. This disparity between the cities is due to the climate differences and their external temperatures during the year, the difference in energy demand to ensure the operation of active cooling between the different models is less important in cities where the climate and the distribution of outdoor temperatures are less hot as Algiers or Palermo. Unlike the city of Cairo or Dubai where difference in terms of energy requirements due to the extreme outdoor temperatures exposes the indoor environment to higher gains over longer periods inducing a greater active cooling demand. This explains the higher values of energy needs when adopting ISO7730 standard. On the other side, the indoor comfort thresholds introduced by EN15251 or ASHRAE55 allows for indoor temperature increase up to 28°C (82.5°F) following the outside temperature. In this sense, the Fanger model is detached from the context of any external change, increasing the energy saving gain (Indraganti et al. 2016).

We are confident after this analysis that all these differences between the comfort temperatures and all these differences in terms of energy need between different models would be even greater if we take into account other parameters beyond the scope of this study. This includes behavioral adaptation and the effect of culture, age and gender. The relative humidity inside the building has not been taken into account in our case study and also other additional data as the combination of diverse guidelines that will generate more cases and thus results, which will be subject of previous studies. Not to mention the psychological aspect that influences the perception of comfort based on socio-cultural parameters such as thermal personal experience called by De Dear (2004) perceptual relativity and the acceptability of the occupants and their tolerance threshold. The temperatures acceptable by the adaptive models can in reality be intolerable by these people even with great acclimation and adaptation capacity, additional field studies must be done to inform building professional on these thresholds and acceptability of the occupant comfort temperatures. It is therefore essential, for further research to study the subject of the adaptive comfort especially in hot climates. In order to refine our analysis with new data that will allow us to ensure occupant comfort with high energy efficiency and introduce in the future new rules of adaptation and comfort control system for NZEOB.

CONCLUSION

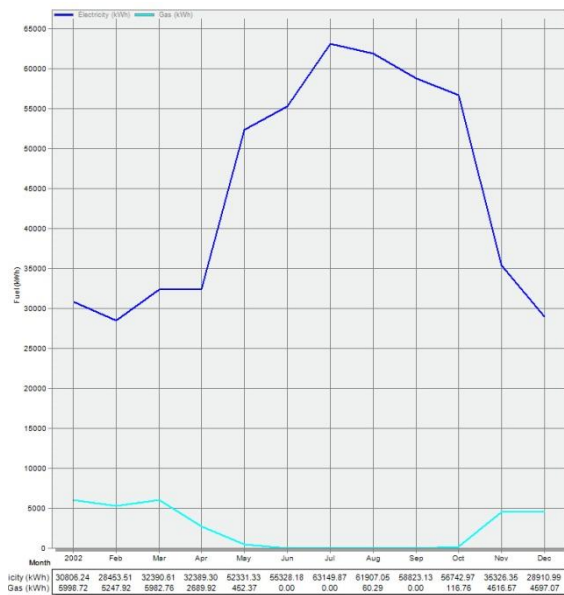
The present study examines the different models of comfort and their impacts on energy needs in the zero energy office buildings in the hot climate. This study is fundamental to identify the best combination to reduce energy consumption and to achieve NZEOBs and sheds light on the importance of the selecting a comfort model. By selecting a comfort such as that Fanger, with a strict and tight comfort thresholds, leads to higher energy consumption and comfort boredom. The static need for cooling based on ISO 7730 requirements, unlike the adaptive models ASHRAE55 standard or EN15251 standard, exposes the cooling systems to shorter life service and users to higher temperature discrepancy between indoors and outdoors, which results in thermal shocks. By using an adaptive thermal comfort model occupants building operation becomes more flexible by relying in part on the ability of human to adapt to its environment and secondly on his ability to interact with their environment. This flexibility and adaptiveness allows reducing our energy consumption up almost 20% and thus gaining efficiency whatever the context, which makes it more useful and suitable for the hot climate. Finally, note that both internal comfort management methods can be coupled and used in the same structure in creating mixed mode systems favoring adaptability to reduce energy consumption and prevent in the same time the risk of overheating in hot climates (dry desert) where extreme temperatures and very high risk of overheating. The overall result can lead to increase the building robustness and energy efficiency.

REFERENCES

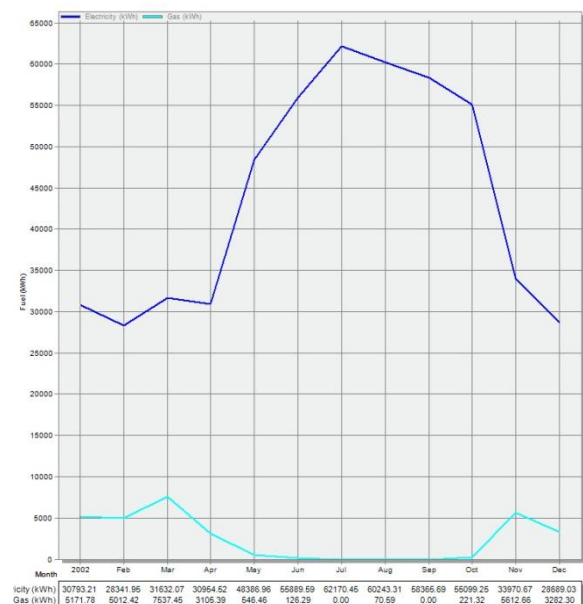
- ASHRAE, A. S. (2013). Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Attia, S., Carlucci, S. (2015a). Impact of Different Thermal Comfort Models on Zero Energy residential Buildings in Hot Climates. *Energy and buildings*, 102, 117-12.
- Attia, S., Hamdy, M., Carlucci, S., Pagliano, L., Bucking, S. and Hasan, A. (2015b) Building performance optimization of net zero-energy buildings, in *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings* (eds A. Athienitis and W. O'Brien), Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany. doi: 10.1002/9783433604625.ch05
- Attia, S., (2012) A Tool for Design Decision Making-Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates, PhD Thesis, UCL, Diffusion universitaire CIACO, Louvain La Neuve, ISBN 978-2-87558-059-7.
- Attia, S., De Herde, A., (2010) Strategic Decision Making For Zero Energy Buildings in Hot Climates, EuroSun, Austria.
- Belkhouane, H., (2017) Etude de l'impact des modèles de confort sur la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's type bureaux (cooling dominated), Master thesis, Liege University.
- Chiancarella, C., Fato, I., Martellotta, F. (2004). Thermal comfort in the climatic conditions of southern Italy. *Technical and Symposium Papers – Annual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Nashville, 110 (2), 578-593.
- De Dear, R. J. (2004). Thermal comfort in practice. Blackwell Munksgaard. *Indoor Air*, 14 (Suppl 7), 32–39.
- De Dear, R. J., Brager, G.S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standar 55. *Energy and buildings*, 36, 549-561.
- Ezzeldin, S., Rees, S., 2013, The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates, *Energy and Buildings*, Volume 65, October 2013, Pages 368-381, ISSN 0378-7788.
- Givoni, B. (1978). *L'homme l'architecture et le climat*. Paris: Le moniteur.
- Gratia, E., Bruyère, I., De Herde, A. (2004). How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Building and Environment*, 39, 1157-1170.
- Henze, G. P., Pfafferott, J., Herkel, S., Felsmann, C. (2007). Impact of adaptive comfort criteria and heat waves on optimal building thermal mass control. *Energy and Buildings*, 39, 221–235.
- Indraganti, M., Boussaa, D., (2016) Occupant's thermal comfort in Qatari offices – Need for the new adaptive standard.
- Indraganti, M., Ooka, R., Rijal, H., Brager, G., (2014) Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India, *Building and Environment*, Volume 74, April 2014, Pages 39-53.
- QScience Proceedings: Vol. 2016, Qatar Green Building Conference 2016 – The Action, 23.
- Nicol, F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, 36(7), 628-637.
- Pagliano, L., Zangheri, P. (2010). Comfort models and cooling of buildings in the Mediterranean zone, *Advances in Building Energy Research*, 4 (1), 167–200.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644.
- Pfafferott, J. U., Herkel, S., Kalz, D. E., Zeuschner, A. (2007). Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria, *Energy and Buildings*. 39, 750-757.
- Sourbron, M., Helsen, L. (2011). Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings. *Energy and buildings*, 43, 423-432.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., Van Den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201-215.
- Van Hoof, J., Hensen, J. L. M. (2007). Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Building and Environment*, 42, 156–170.
- Yao, R., Li, B., Liu, J. (2009). A theoretical adaptative model of thermal comfort – Adaptative Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44, 2089-2096.
- Yang, L., Yan, H., Lam, J.C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*, 115, 164-175.

Annexe 02: Evaluation mensuelle de l'humidité relative ainsi que les besoins en électricité et en gaz dans le bâtiment suivant les différents modèles de confort et dans les différentes villes.

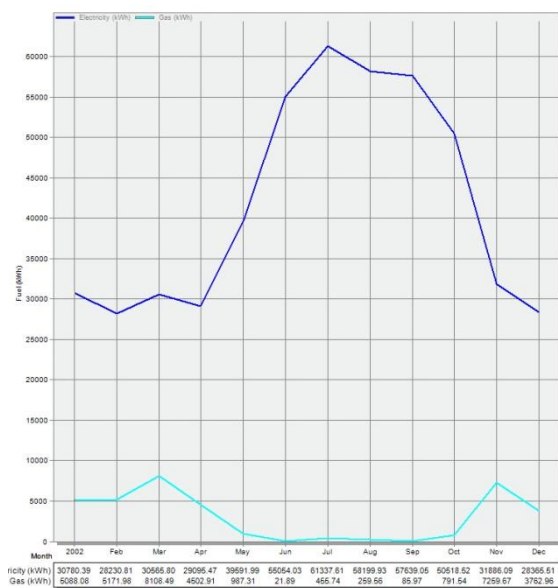
- **Annexe 02-a :** Alger Evaluation des besoins en électricité et en gaz



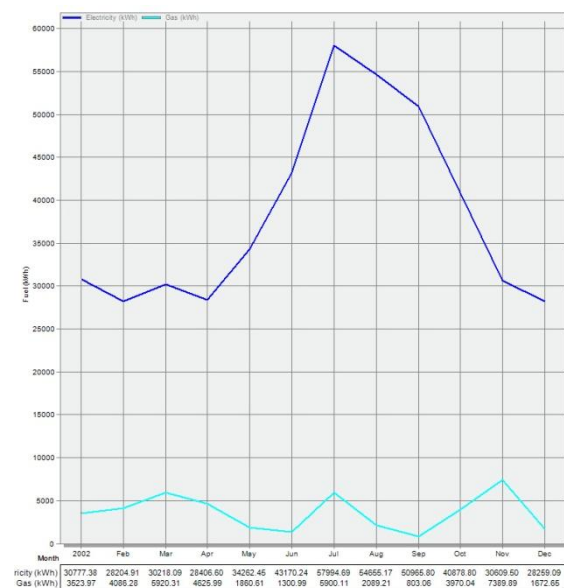
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

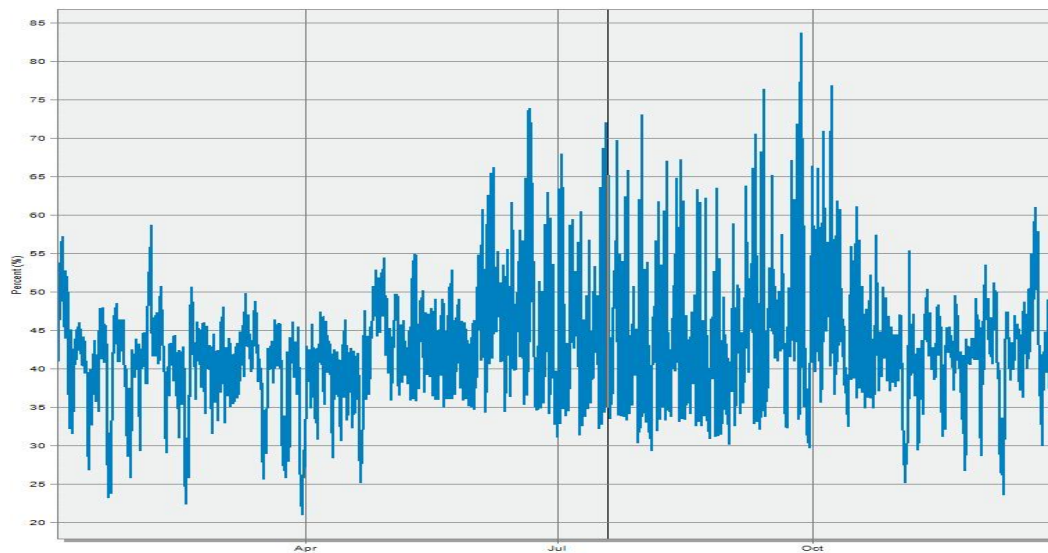


c) EN 15251

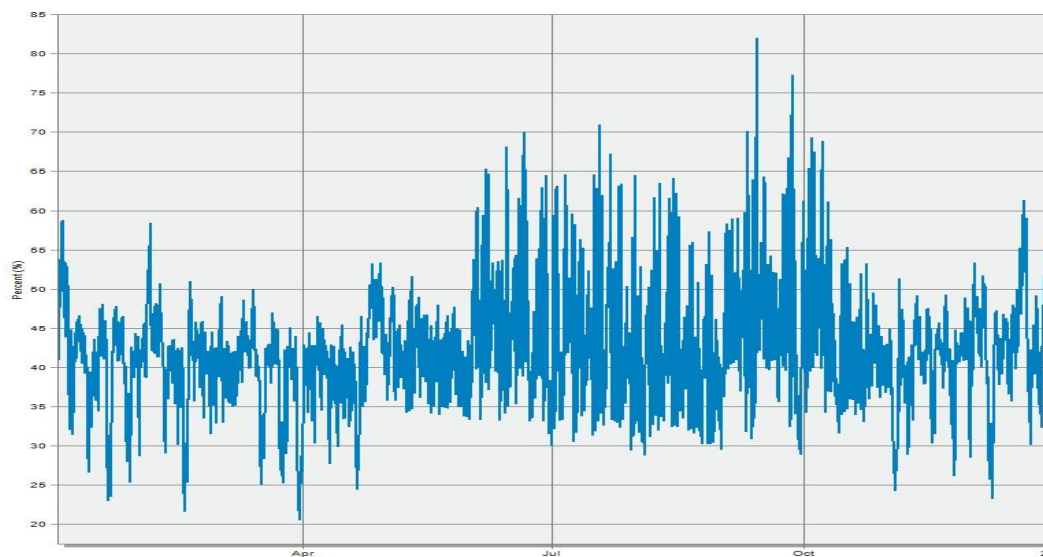


d) GIVONI

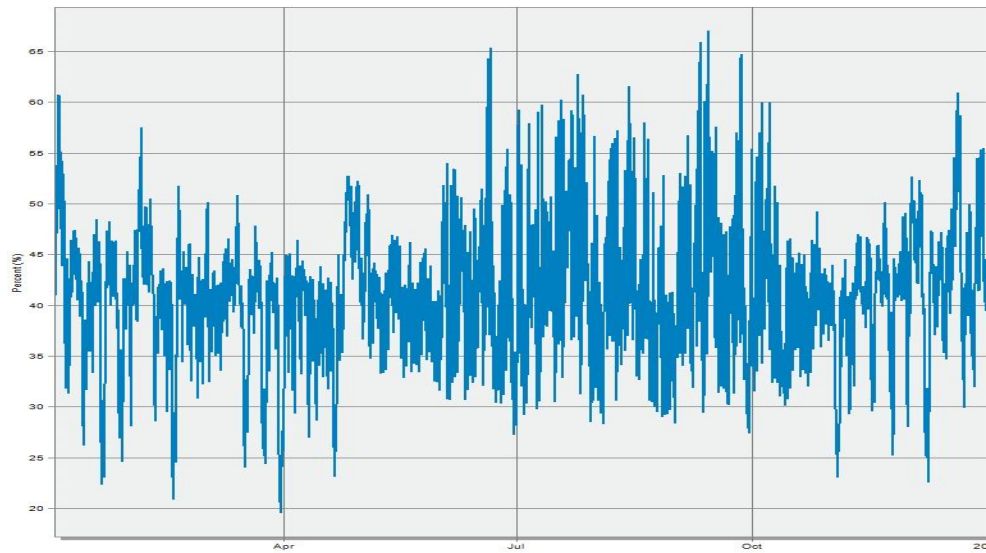
Evolution mensuelle de l'humidité relative



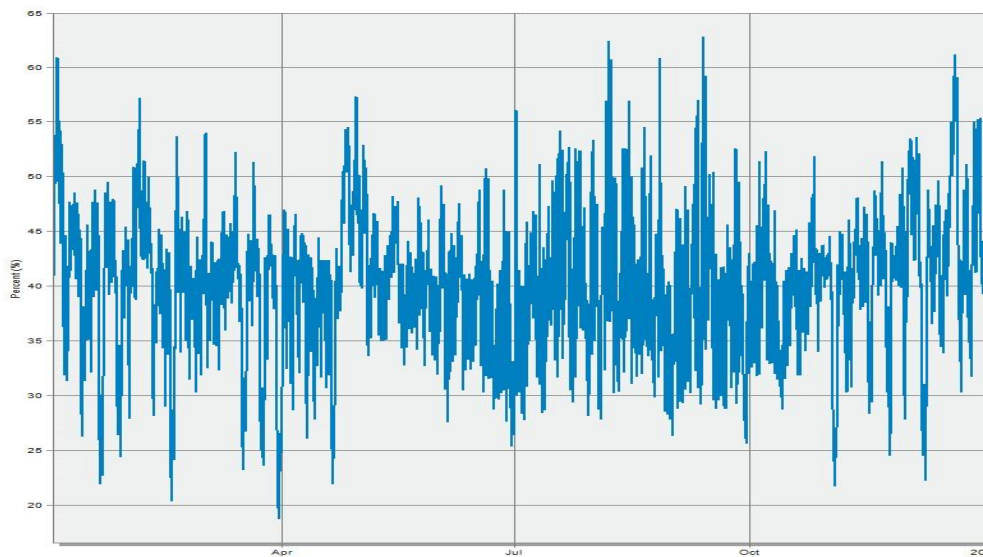
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

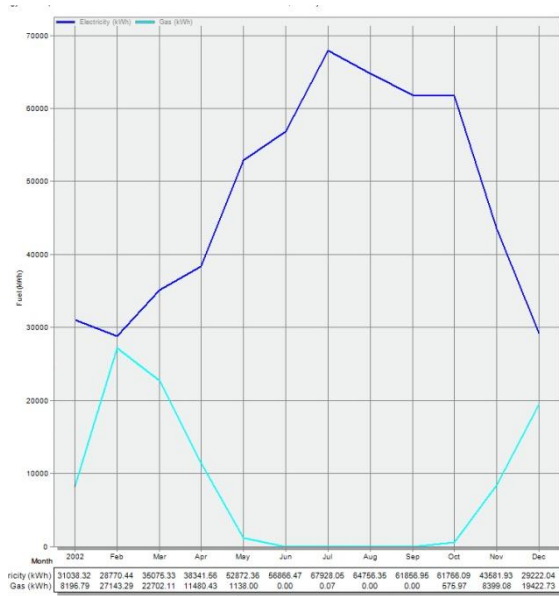


c) EN 15251

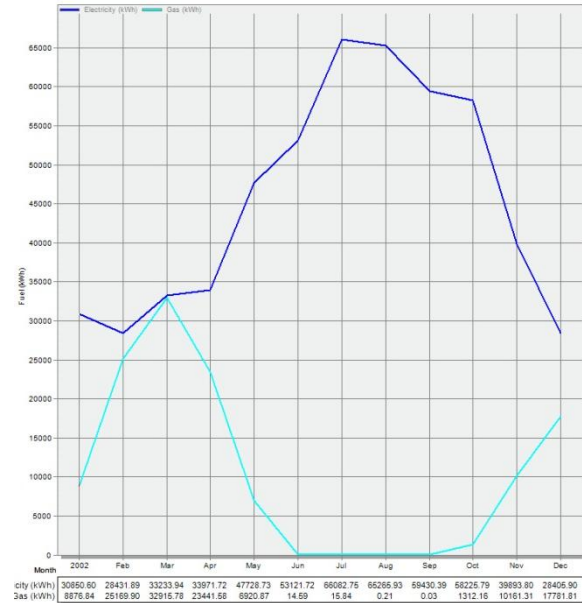


d) GIVONI

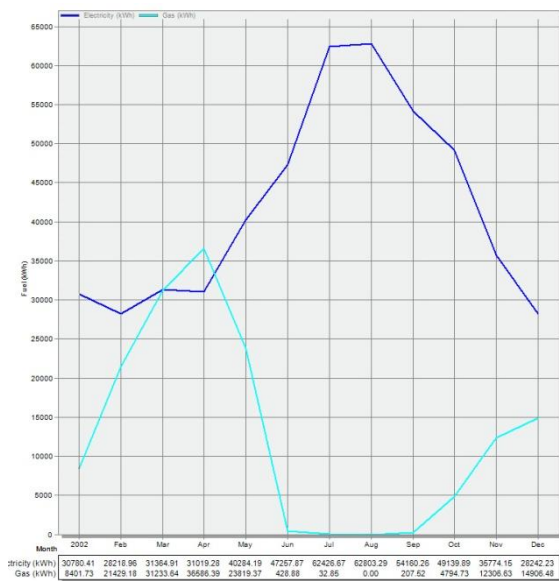
- **Annexe 02-b : Le Caire. Evaluation des besoins en électricité et en gaz**



a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

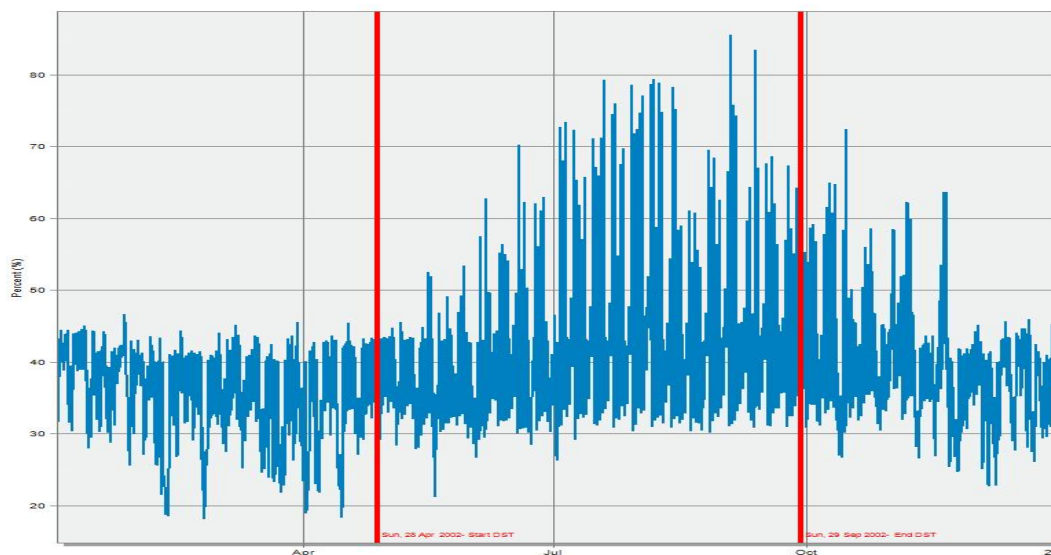


c) EN 15251

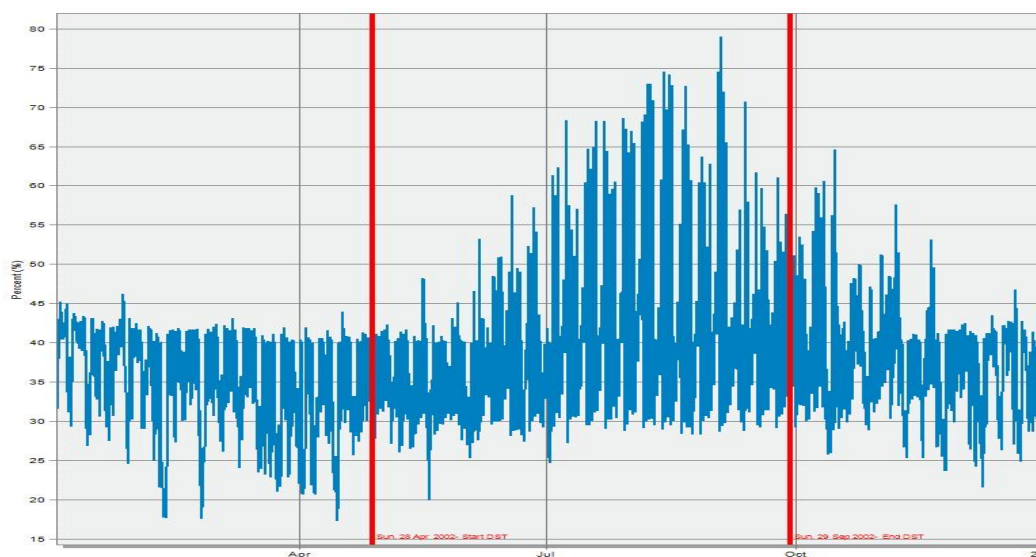


d) GIVONI

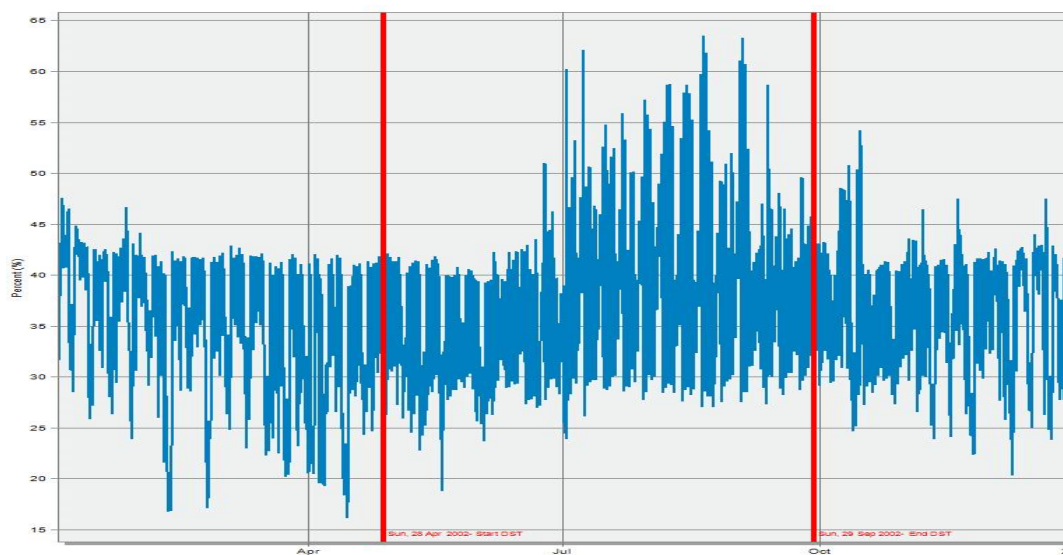
Evolution mensuelle de l'humidité relative



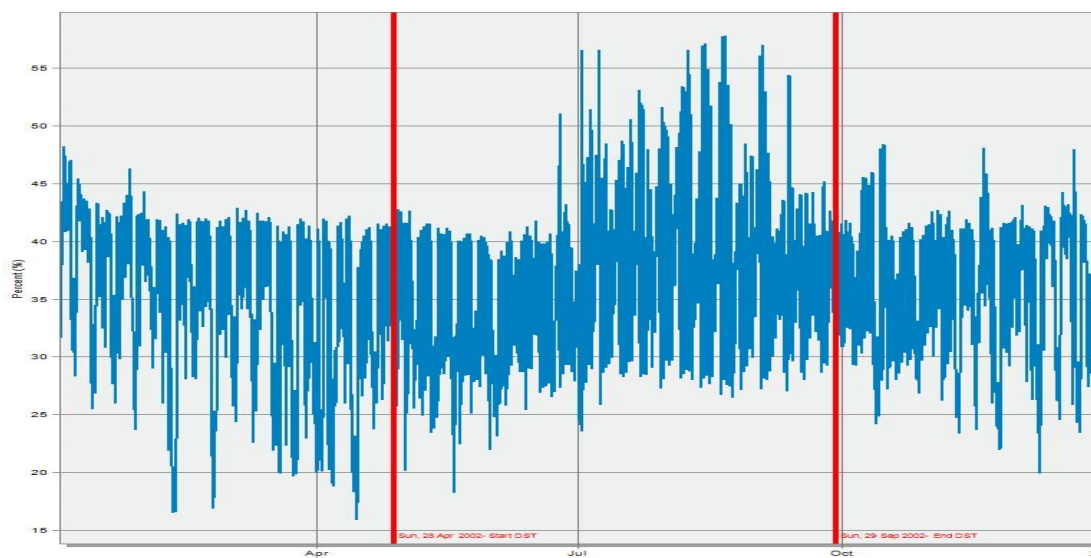
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

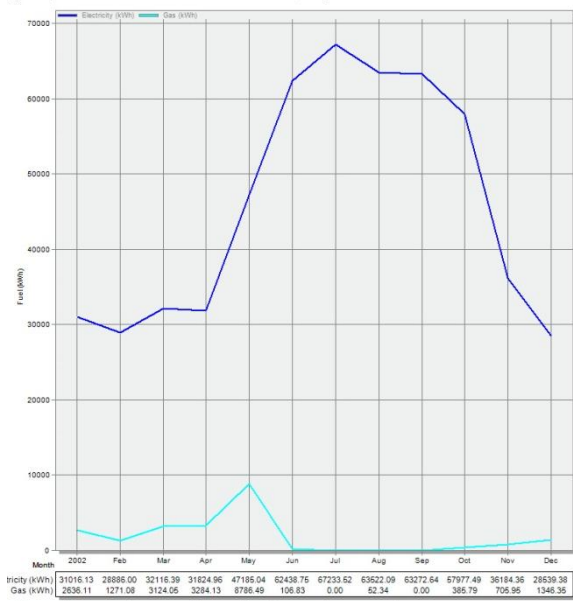


c) EN 15251

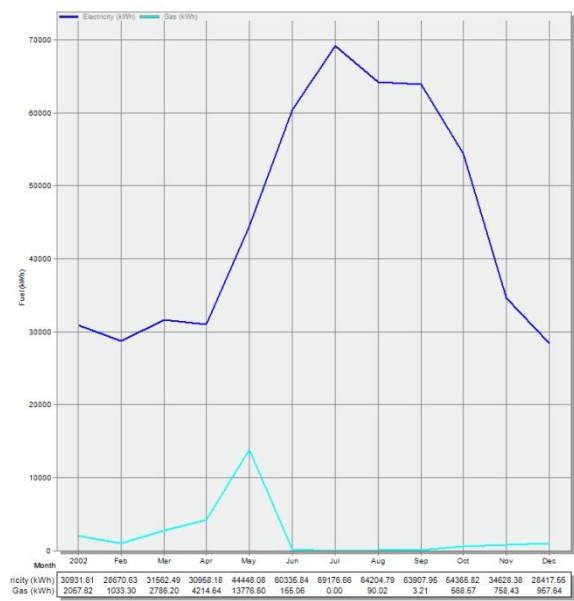


d) GIVONI

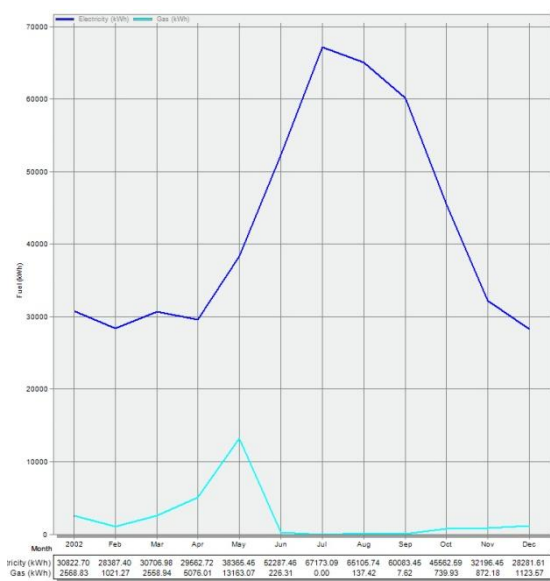
- **Annexe 02-c : Palerme** Evaluation des besoins en électricité et en gaz



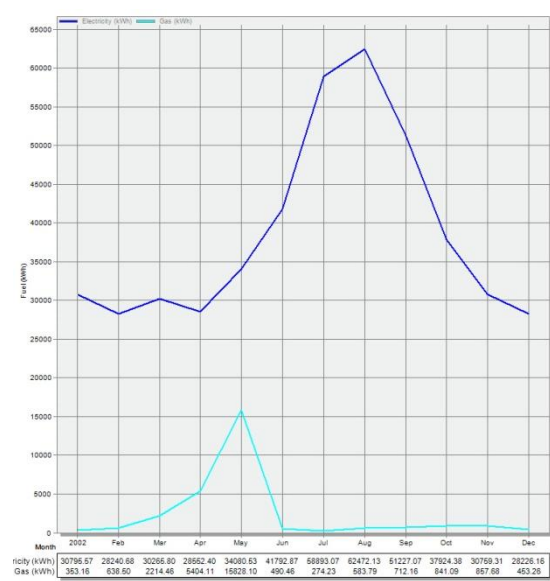
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

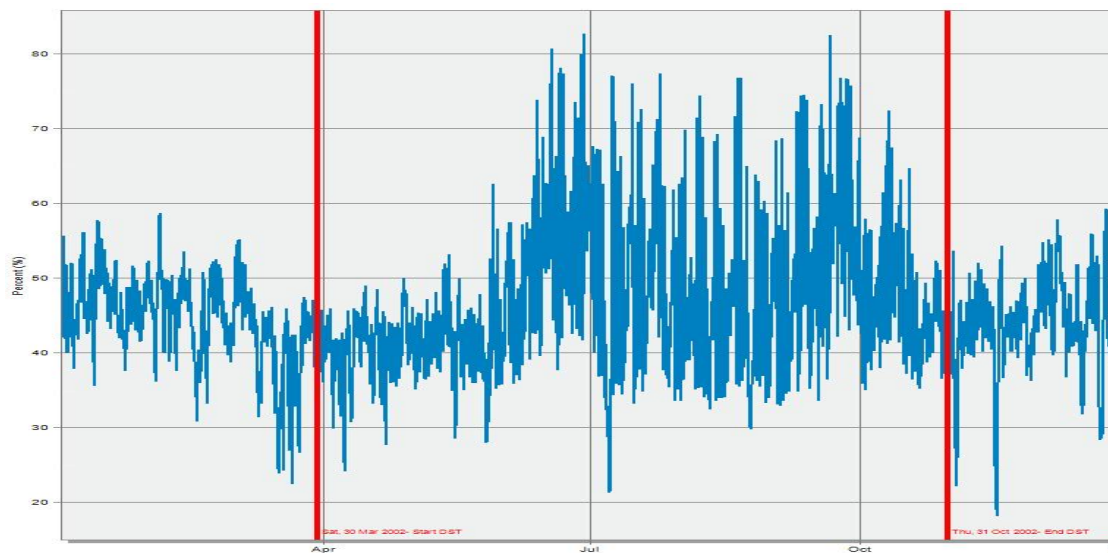


c) EN 15251

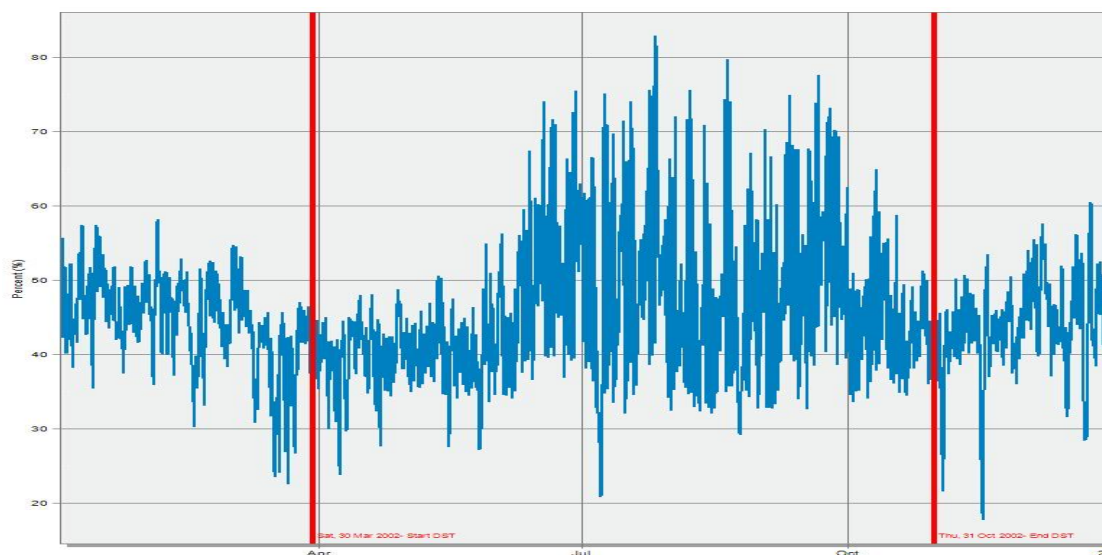


d) GIVONI

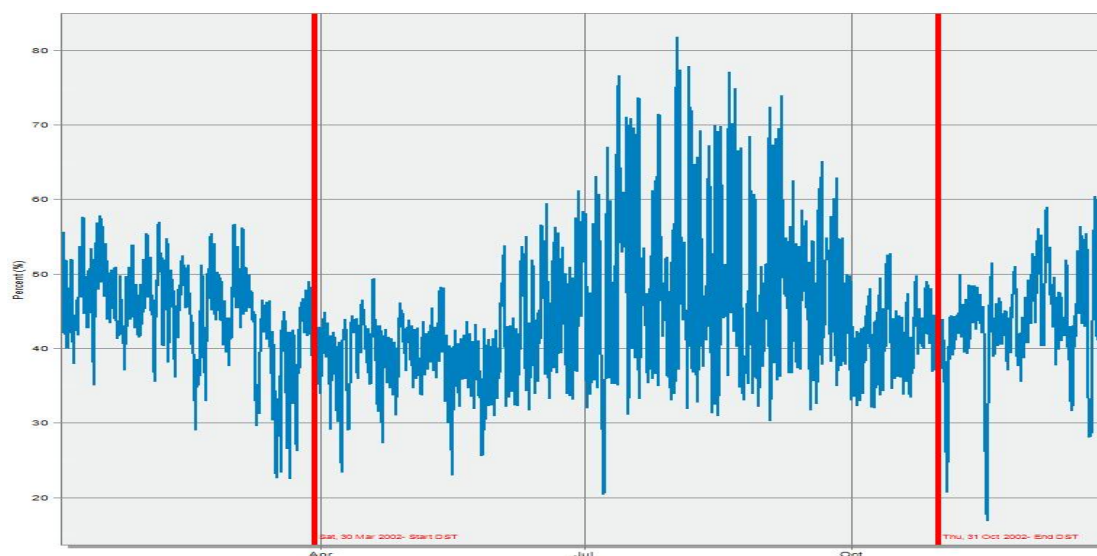
Evolution mensuelle de l'humidité relative



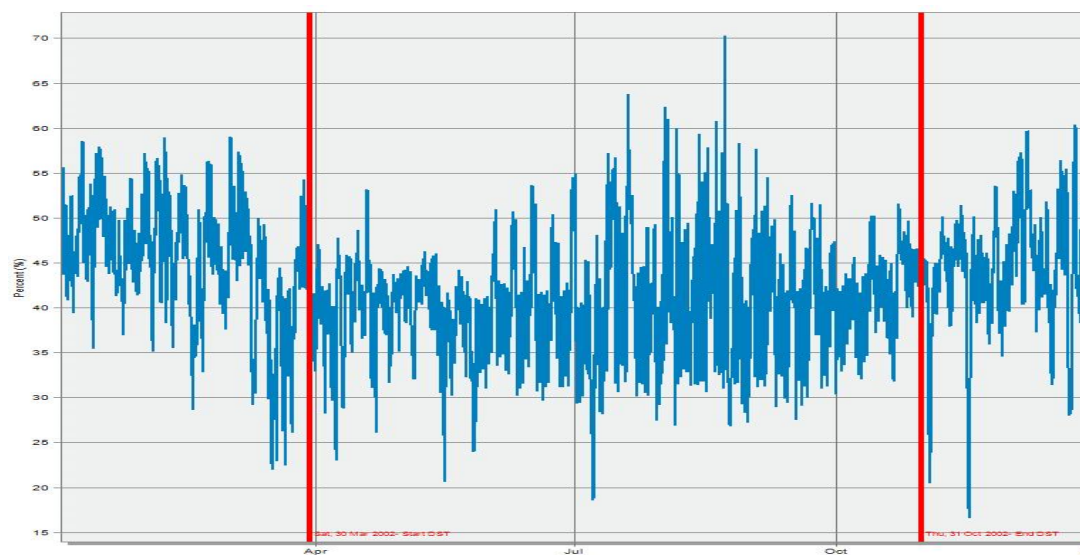
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

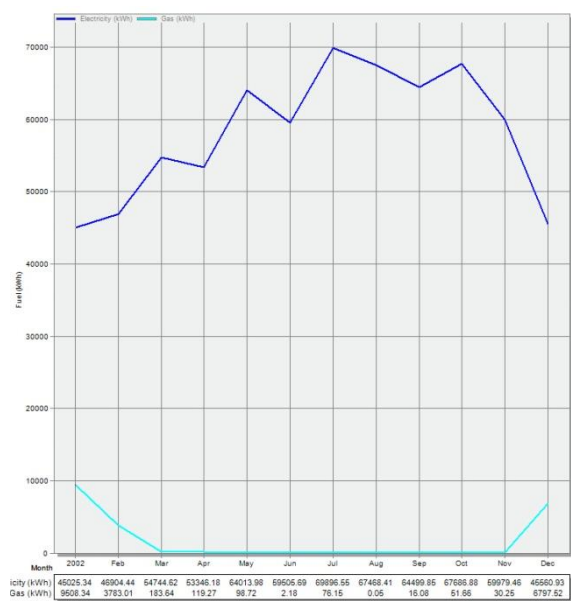


c) EN 15251

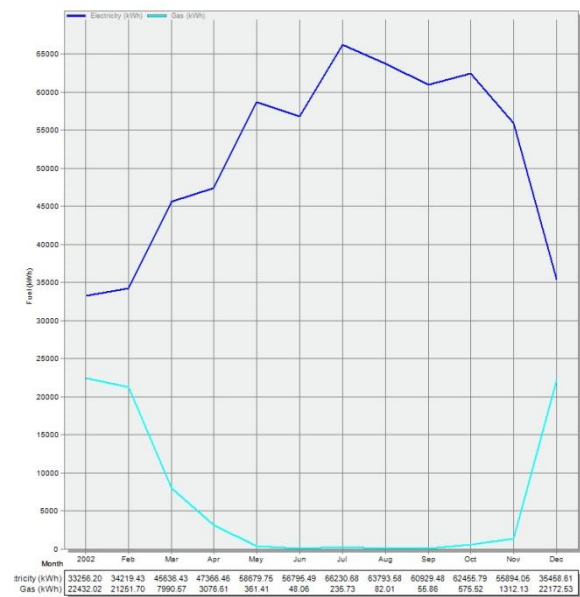


d) GIVONI

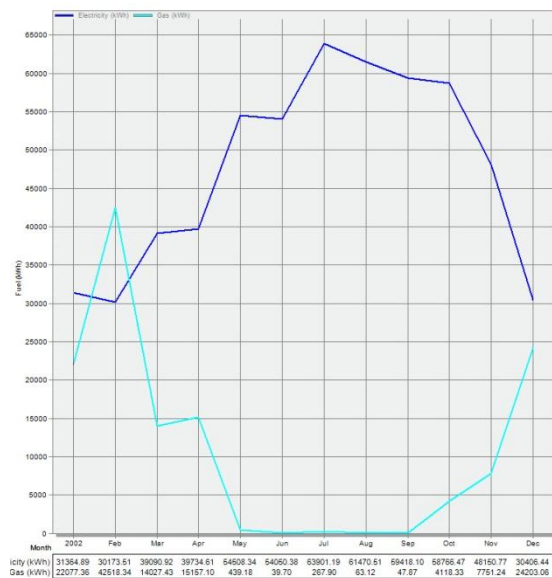
- **Annexe 02-d : Dubaï** Evaluation des besoins en électricité et en gaz



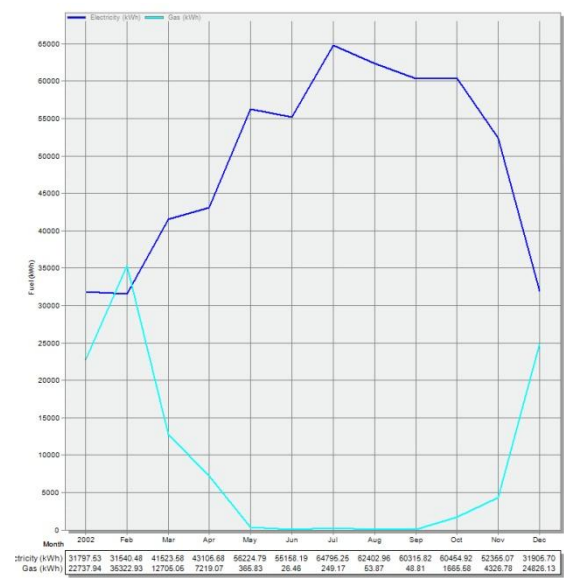
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55

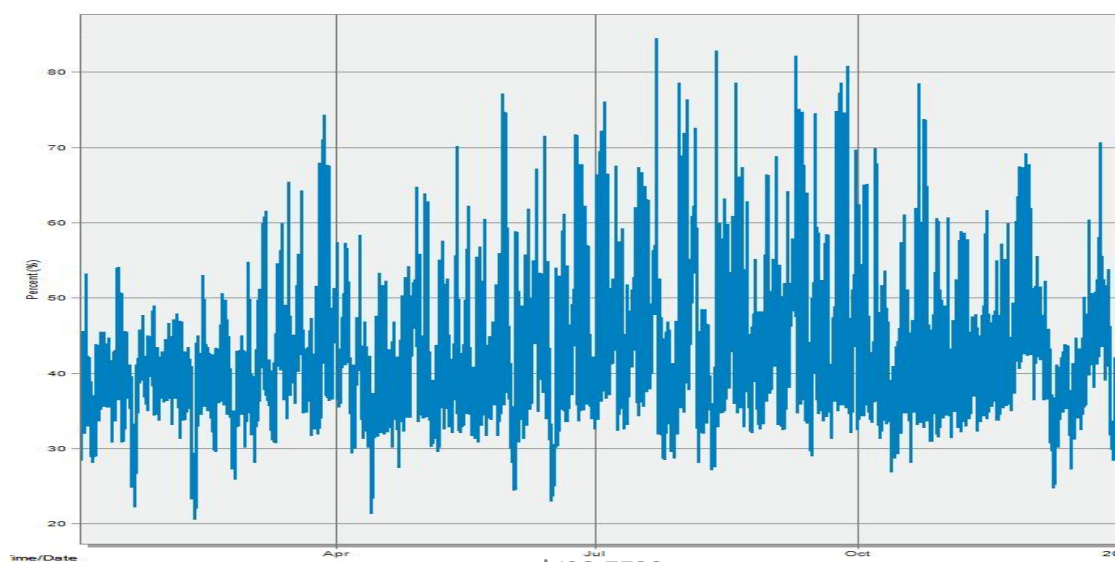


c) EN 15251

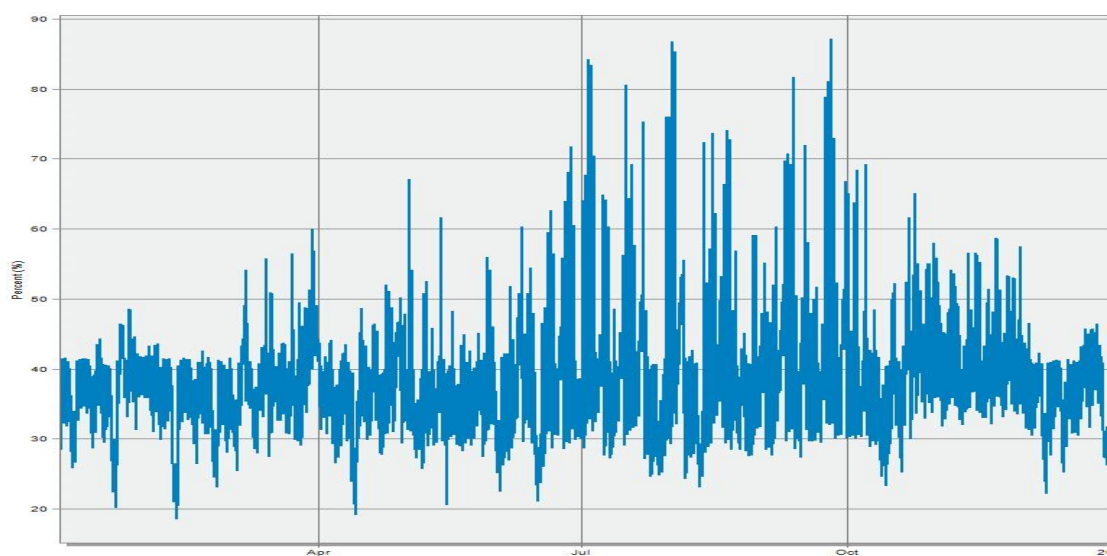


d) GIVONI

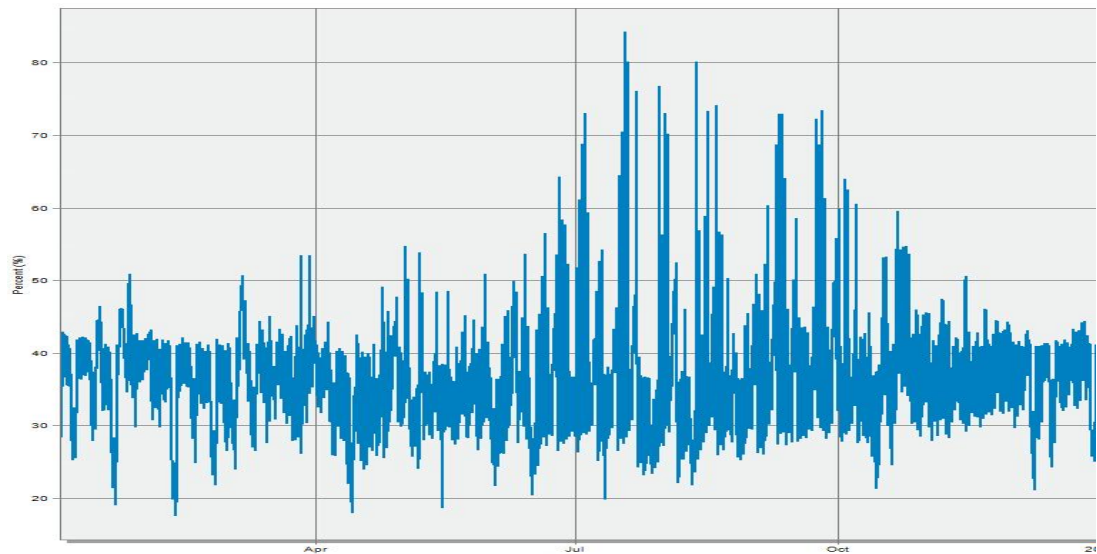
Evolution mensuelle de l'humidité relative



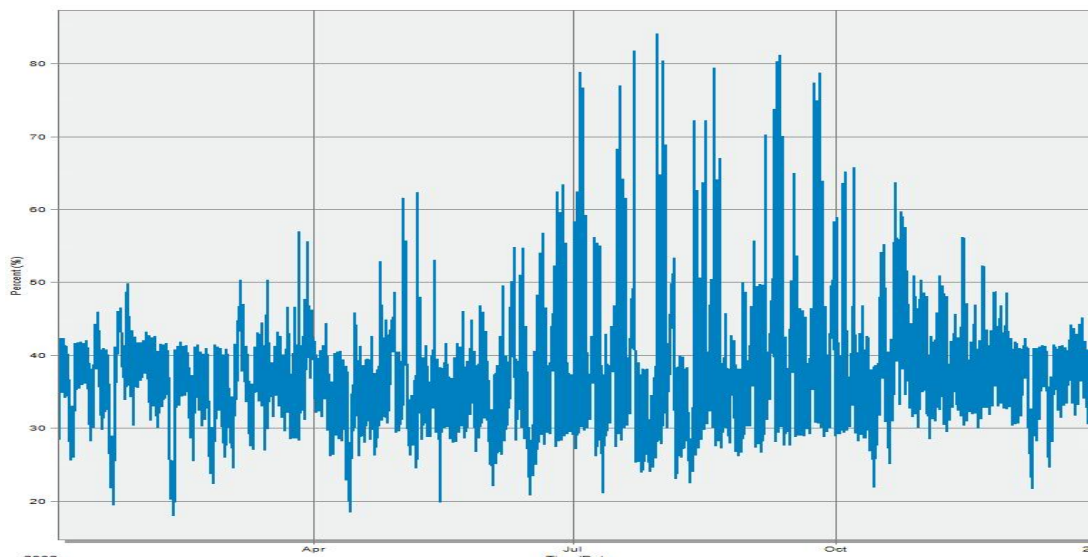
a) ISO 7730



b) ASHRAE 55



c) EN 15251



d) GIVONI