
Soumis le : 03/05/2015

Forme révisée acceptée le : 18.12.2015

Email de l'auteur correspondant :

E-mail: sarabenh81@yahoo.fr

Nature & Technology

Approche adaptative du confort thermique dans les espaces d'enseignement universitaire à Constantine (Algérie)

Sarah Benharkat,^a Djamila Rouag-Saffidine^b

^a Laboratoire ABE- Université de Constantine 3, Ville Nouvelle Ali Menjli, Constantine 25000, Algérie

^b Laboratoire Energie et environnement, Université de Constantine 3, Ville Nouvelle Ali Menjli, Constantine 25000, Algérie

Résumé

Comptant vraisemblablement parmi les premières recherches sur le confort thermique adaptatif dans les espaces d'enseignement dans les régions à climat chaud et aride, la présente étude a été entreprise à Constantine, ville du Nord-est de l'Algérie. Elle consiste en une évaluation objective des paramètres physiques du confort thermique (température de l'air T_a , température radiante T_r , humidité relative HR, vitesse de l'air V_a) dans des salles de cours universitaires ventilées naturellement. Celle-ci a permis le calcul des indices PMV et PPD de Fanger, ainsi qu'une évaluation subjective de l'environnement thermique collectée grâce au questionnaire dit « longitudinal ». Ce dernier est l'outil qui nous a permis d'estimer l'Impédance thermique du vestiaire I_{clo} des occupants, le Vote Moyen Actuel (AMV) sur l'échelle de 7 points de ASHRAE, le Vote de Préférence Thermique (TPV), le Pourcentage Actuel d'insatisfaits (APD) ainsi que le comportement adaptatif entrepris par ces derniers. L'enquête a été effectuée durant l'année académique 2012-2013 sur trois périodes (hivernale, mi saison et chaude). Le Vote Moyen Actuel (AMV) a été comparé au vote moyen prévisible PMV et le Pourcentage Actuel d'insatisfaits (APD) a été comparé au pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD. Une zone de confort thermique adaptative est proposée pour chaque période en se basant sur les résultats de l'enquête et comparée à ceux d'autres études et modèles adaptatifs.

Mots clés: confort thermique, salles de cours, modèle adaptatif, modèle de Fanger.

1. Introduction

En accord avec le standard 55 de l'ASHRAE [1], le confort thermique est défini comme étant « cette condition d'esprit qui exprime une satisfaction envers l'environnement thermique et estimée par une évaluation subjective ». L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit également le confort thermique comme « une condition lorsque les gens sont satisfaits de l'environnement thermique » et déclare que la santé est un état général de bien-être physique, mental et social et non pas l'absence de maladies ou d'infirmités seulement [2]. Dans la littérature, nous distinguons deux types d'approche du confort thermique:

a) *Modèle de Fanger:*

Dans les années 70, Fanger [3] a développé une approche statique dite analytique basée sur l'équilibre thermique du corps humain en introduisant les deux indices: le vote moyen prévisible PMV et le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD utilisés dans la norme ISO 7730 [4].

Ces indices prennent en considération quatre facteurs environnementaux qui sont la température de l'air T_a ,

l'humidité relative HR, la température radiante T_r et la vitesse de l'air V_a ainsi que deux facteurs humains qui sont le métabolisme et l'habillement. Cependant, cette approche présente plusieurs limites qui sont:

-L'équation de confort de Fanger a été développée dans des chambres climatiques dans lesquelles les sujets étaient immergés dans un environnement parfaitement contrôlé par un système HVAC. Donc selon certains chercheurs, elle n'est pas valable pour les bâtiments ventilés naturellement. En effet, selon Nicol et Humphreys [5], le PMV ne prédit pas avec précision le vote de sensations thermiques des occupants sur l'échelle de 7 points de ASHRAE: ces dernières sont sous-estimées en période hivernale et surestimées en période estivale. Les enquêtes menées par de Dear et Brager [6] dans des locaux non climatisés révèlent le même phénomène à savoir que la température de confort observée lorsque la température extérieure est de 30 °C est de 1,5 °C plus élevée que celle prévue par les indices de Fanger.

Plus récemment, Ogbonna et coll. [7], rapportent dans une étude menée en Afrique sub-saharienne (Nigeria) pendant l'été que le PMV est plus élevé que le vote moyen actuel AMV.

- D'autre part, la prise en compte des effets hygrothermiques engendrés par la vêtue est très schématique. Celle-ci est représentée comme une couche uniforme d'isolation entre le corps et l'environnement ayant une température de surface unique. Outre que les vêtements

ne sont pas uniformes, certains phénomènes ne sont pas pris en compte.

-La norme ISO 7730 donne des intervalles de validité pour les variables du PMV et lorsqu' une ou plusieurs variables sont situées en dehors de ces intervalles, les résultats obtenus sont considérés comme non fiables. Actuellement ces intervalles sont largement discutés par Humphreys et Nicol [5] qui ont conclu qu'ils sont beaucoup plus étroits.

-Par ailleurs, la relation entre le PMV et le PPD a aussi fait l'objet de débats chez les spécialistes puisque d'après Van Hoof [8], les résultats obtenus dans différentes chambres climatiques et plusieurs recherches diffèrent des résultats obtenus par la relation PMV/PPD de Fanger.

b) Modèle adaptatif:

Vers la fin du 20^{ème} siècle et le début du 21^{ème}, l'approche adaptative est mise en place. Le principe adaptatif est énoncé en ces termes par Humphreys et Nicol [9] : « si une modification des conditions climatiques se produit et provoque de l'inconfort, les personnes entreprendront des actions visant à rétablir leur confort ». De Dear et Brager [6] classent ces actions d'adaptation envisageables en trois catégories : comportementales, physiologiques et psychologiques.

Toutefois, peu d'enquêtes sur le confort thermique adaptatif en climat chaud et aride ont été menées jusqu'ici. On citera celles menées en Australie [10], Egypte [11], Kuwait [12], Lybie [13,14,15] et en Tunisie [16]. Certaines villes sont prises en considération également par Nicol et coll. dans leur projet au Pakistan [17]. Ces recherches ont été menées principalement dans les espaces de travail (bureaux) et certaines dans les bureaux et les bâtiments résidentiels à la fois alors qu'une seule étude a été entreprise dans des espaces d'enseignement universitaire [11].

A notre connaissance, aucune étude de ce genre n'a été menée en Algérie. Les recherches sur le confort thermique sont de type 1 limitées aux mesures de température de l'air et d'humidité relative. L'étude de M'sellem [18] qui a concerné des espaces de bureaux dans la région de Biskra, elle a comparé le vote de sensation thermique et le pourcentage d'insatisfaits collectés par le biais d'un questionnaire aux indices de confort PMV et PPD calculés par simulation informatique à l'aide du logiciel Derob-Lth. Des résultats de cette enquête il est ressorti que le confort et l'inconfort perçus par les occupants sont différents du confort et de l'inconfort évalués par les techniques d'analyse bioclimatique, à savoir qu'il fait plus chaud et moins froid en réalité qu'en théorie.

2. Récentes études sur le confort thermique dans les espaces d'enseignement

En 1968, Pepler et Warner [19] ont été les premiers chercheurs à étudier les effets de l'environnement thermique sur les performances intellectuelles des

étudiants. Leurs expériences ont été réalisées sur 36 femmes et 36 hommes dans des chambres climatiques et dont les résultats ont confirmé l'existence d'une relation inverse entre le temps pour accomplir une tâche et la température, avec une meilleure performance aux alentours des 26,7°C. Effectivement, à cette température, les étudiants ont achevé le travail assigné dans les temps les plus courts.

Plus récemment, Corgnati et coll. [20, 21] ont étudié les préférences thermiques d'élèves dans des établissements d'enseignement à Turin (Italie) en utilisant les deux approches : l'approche analytique de Fanger et l'approche adaptative. La première enquête a été menée en hiver avec le système de chauffage active tandis que la seconde a été réalisée en Septembre et Mai sous des conditions de ventilation naturelle. L'étude a démontré une évolution progressive de la préférence thermique des usagers de l'hiver au printemps puisque pendant la période de chauffage, les étudiants préfèrent les environnements « légèrement chauds » ou « chauds »; tandis que pendant la mi-saison, ils préfèrent un environnement « neutre ». D'autre part, en mi-saison, les pourcentages d'élèves insatisfaits prévus par le modèle de Fanger (PPD) et ceux issus du modèle adaptatif sont similaires, dans la mesure où ils étaient inférieurs à 10%. Toutefois, en tenant compte des résultats des questionnaires, le pourcentage réel d'insatisfaits (PD) est significativement plus élevé que le PPD; Cet écart augmente lorsque la température opérative intérieure est supérieure à 20,5° C ou bien lorsque le PMV est au-dessus de (-0.5). En outre, et comme l'a souligné Mayer dans ses études [22], le vote de sensation thermique +2 considéré comme inacceptable par Fanger, est plutôt acceptable et préféré par les occupants. D'ailleurs, en ne considérant que les personnes insatisfaites exprimant le vote -3, -2 et +3 (sans le vote +2), l'indice de Fanger PPD s'est avéré plus proche du PD.

A ce sujet, Von Grabe et Winter [23] ont démontré que les personnes qui votent ± 2 ou plus sur l'échelle de ASHRAE, ne sont pas nécessairement insatisfaites (ce qui est l'hypothèse de base de la notion classique du PPD), de même que les gens qui votent entre -1 et +1 ne sont pas nécessairement satisfaits de leur environnement thermique. De leur côté, Buratti et Ricciardi [24] ont effectué une enquête au niveau des universités de Pérouse, de Terni et de Pavie en utilisant le questionnaire et la collecte de données sur le microclimat et dont le but était de comparer les données fournies par les modèles théoriques de Fanger et de Wray (développé en 1980 et basé sur l'équation d'équilibre thermique Fanger) avec les données expérimentales. L'étude a révélé que les deux modèles convergent et que les résultats obtenus par ces derniers sont similaires aux résultats obtenus par le questionnaire.

Stefanizzi et coll. [25] ont également entrepris une enquête dans des salles de cours de l'université Polytechnique de Bari (sud de l'Italie) au mois de Mars pour comparer également le modèle de Fanger au modèle adaptatif ainsi qu'au vote moyen actuel AMV du questionnaire. Les valeurs du PMV et PPD sont similaires au vote réel, bien qu'une légère sous-estimation a été relevée par les deux modèles.

Quand à Mors et coll. [25], ils ont comparé le vote moyen actuel AMV avec le vote moyen prévisible PMV et les températures limites dans des classes d'une école primaire afin de tester l'efficacité du modèle de Fanger et le modèle adaptatif sur les enfants. Les chercheurs ont conclu que le modèle de Fanger sous-estime la sensation thermique, avec une plus grande erreur en été. D'autres part, les enfants préfèrent des températures inférieures à celles prédites par le modèle adaptatif. Enfin, De Giuli et coll. [26] ont évalué les conditions de l'environnement intérieur et les niveaux de confort dans trois écoles primaires italiennes. Le PMV et le PPD ont été calculés, et une approche adaptative a également été appliquée, mais les résultats ne correspondent pas à l'évaluation subjective du confort thermique par les élèves.

3. Cas d'étude L'enquête a été menée à Constantine, ville du Nord-est de l'Algérie (latitude $36^{\circ}16' N$, $6^{\circ}6' E$). Selon la classification mondiale des climats de Koppen [28], Constantine appartient à la zone climatique B caractérisée par un climat méditerranéen: un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de $7.15^{\circ}C$, juillet est le mois le plus chaud avec une température moyenne égale à $26.6^{\circ}C$.

L'environnement d'étude se confine aux bâtiments de la Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation (université de Constantine 2) située à la ville nouvelle Ali Mendjeli de Constantine. Il est composé de deux blocs A et B avec patios découverts et compte 20 salles de cours et quatre amphithéâtres. Les salles de cours du bloc A sont orientées nord-est et nord-ouest. Celles du bloc B (Fig.1) ont une orientation nord et Ouest. L'investigation a été menée dans deux salles de cours du bloc B: l'une orientée vers le nord et l'autre vers l'ouest. Les deux salles sont situées au rez de chaussée et ont les mêmes caractéristiques géométriques: de forme pratiquement carrée ($8m90 \times 9m90$), une surface de $88m^2$ et d'une capacité de 50 places pédagogiques (Fig.2). Leur indice de profondeur a été estimé à 2.82 tandis que l'indice de vitrage ($S_{ouverture}/S_{plancher}$) est égal à 18,8%.

Les murs sont en briques creuses avec une lame d'air tandis que le vitrage utilisé est un vitrage simple de contrôle solaire de type Stopsol Classic Bronze (AGC sarl)

de 4mm d'épaisseur dont la transmission lumineuse est de 22% et le facteur solaire égal à 40%.

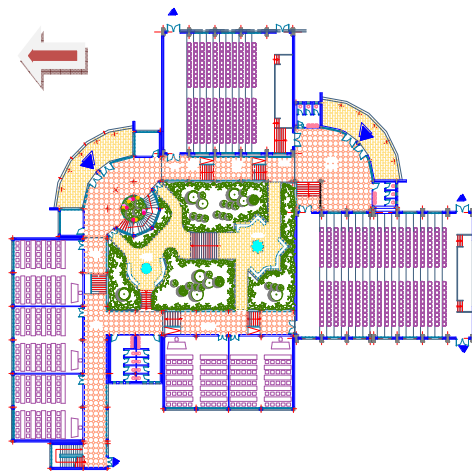


Fig1: plan de RDC du bloc B de la faculté de psychologie.

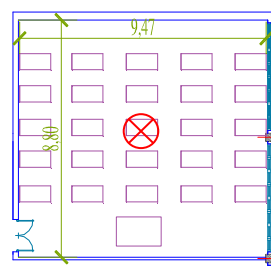


Fig2: plan des salles de cours avec position de la station de mesure.

4. Methodologie

Dans le but d'une évaluation post occupationnelle EPO de ces deux salles de cours, nous avons recourus à deux méthodes différentes mais complémentaires pour estimer le confort thermique, à savoir la méthode quantitative objective et la méthode qualitative subjective.

4.1- Méthode quantitative et objective:

Elle est basée sur la mesure des conditions microclimatiques des deux salles de cours selon la norme ISO 7730. Les variables indépendantes objectives ont été mesurées par la station microclimatique HD 32.2, instrument d'analyse des indices WBGT, PMV et PPD pour les environnements modérés (Delta OHM Sarl). Equipée de trois sondes, cette station nous a permis de mesurer simultanément: la température globe T_g ($^{\circ}C$), la température de l'air ambiant T_a ($^{\circ}C$), l'humidité relative HR (%) ainsi que la vitesse de l'air intérieur V_a (m/s). L'intervalle des mesures était de 10 mn et la station a été placée au centre géométrique des salles de cours à une hauteur de 1.1m du niveau du plancher, comme le recommande la norme EN 7726 [29]. Les valeurs sont

téléchargées et élaborés avec le logiciel Deltalog 10 fourni avec la station microclimatique. Pour le calcul du PMV et le PPD, le taux métabolique a été fixé à 1.2 Met, comme indiqué dans certaines recherches menées dans les salles de cours universitaires [11,24,25]. Quant à l'impédance thermique du vestiaire I_{cl} , elle a été calculée pour chaque participant à partir du questionnaire « longitudinal » en se basant sur la norme ISO 9920 [30]. Une moyenne a été établie pour chaque journée de mesure. La formule utilisée pour le calcul de l'impédance thermique du vestiaire est celle développée par Olesen [31]:

$$I_{cl} = \sum I_{clu,i} \dots \dots \dots \text{ (Equation 1)}$$

Conformément à l'approche adaptative, un autre indice thermique a été calculé, celui de la température opérative T_{op} , à partir de la formule suivante :

$$T_{op} = C_{op} T_{air} + (1 - C_{op}) T_r \dots \dots \dots \text{ (Equation 2)}$$

$$C_{op} = 0.5 \text{ si } V_a < 0.2$$

$$C_{op} = 0.6 \text{ si } 0.2 \leq V_a < 0.6$$

$$C_{op} = 0.7 \text{ si } 0.6 \leq V_a$$

Quant à la campagne de mesure, elle s'est déroulée durant l'année universitaire 2012-2013 à partir du mois de décembre 2012 jusqu'au mois de Mai 2013).

4.2- Méthode qualitative et subjective:

Elle est basée sur l'observation directe et le questionnaire « longitudinal » qui constitue le cœur de l'approche adaptative du confort thermique [9]. Elaboré selon la norme ISO 10551 [32], le questionnaire a comporté quatre sections:

-la première a concerné les informations générales sur les répondants: âge, sexe, groupe d'usagers, habillement et position dans la salle.

- La seconde qui s'est axée sur le confort thermique a comporté des questions à échelle de différenciations sémantiques sur : le Vote de Sensation Thermique basée sur l'échelle de sept points de l'ASHRAE (-3 très froid à +3 très chaud) qui nous permet d'estimer le Vote Moyen Actuel (AMV), la préférence thermique (échelle de 7 points de ASHRAE), acceptabilité de l'environnement thermique, la satisfaction envers l'environnement thermique selon l'échelle de 5 points de Potvin (très agréable, agréable, Neutre, inconfortable et intolérable), sensation du mouvement de l'air et préférence du mouvement de l'air (échelles de Brager). Ainsi qu'une question à choix multiples sur le comportement adaptatif entrepris par les répondants dans le but d'améliorer leur confort thermique.

- La troisième section a concerné le confort visuel. Elle englobe des questions sur la perception de l'environnement lumineux des salles, la satisfaction visuelle, l'acceptabilité de l'environnement lumineux, l'éblouissement et ses sources ainsi qu'une question à choix multiples sur le

comportement adaptatif entrepris par les répondants dans le but d'améliorer leur confort visuel, mais qui sera développé dans un autre article.

-Enfin, la quatrième section a porté sur les systèmes de contrôle environnemental (SCE) : elle examine la capacité des systèmes de contrôle existants (fenêtres, portes, rideaux, radiateurs...) à influencer sur les conditions microclimatiques de l'environnement ainsi que la perception et la satisfaction des répondants envers ces moyens.

Les occupants des salles de cours répondaient aux questionnaires vers la fin de chaque séance qui comptait 1h30 pendant que les variables objectives sont enregistrées simultanément. Les données ainsi recueillies sont traitées par le logiciel de traitement statistique Modalisa 5.0.

5. Résultats et discussion:

5.1-L'environnement thermique intérieur: Un résumé statistique des paramètres environnementaux intérieurs relevés dans les salles de cours durant les trois périodes d'investigation sont présentés dans le tableau 1.

D'après ce tableau, nous observons que la température opérative T_{op} la plus élevée enregistrée en hiver dans les salles de cours est de l'ordre de 26.3°C et la plus basse est de 16.8°C. En mi saison, la $T_{op} \text{ max} = 25.95^\circ\text{C}$ et la $T_{op} \text{ min} = 16.95^\circ\text{C}$ alors que durant la période chaude (Mai), la T_{op} atteint les 28.8°C et la valeur minimale est égale à 21.65°C.

L'humidité relative moyenne varie entre 34.56% en hiver, 29.83% en mi saison et 30.47% en période chaude.

La vitesse moyenne de l'air est maximale durant la période chaude et minimale pendant l'hiver. En effet, en période chaude, elle est trois fois supérieure à celle enregistrée en hiver car les ajustements portés à l'environnement par les usagers (comportement adaptatif) notamment le maintien des portes et des fenêtres ouvertes, ont pour but d'augmenter les échanges de chaleur par évaporation cutanée en cette période.

En conclusion, l'environnement thermique intérieur des salles de cours est chaud et sec pendant les trois périodes d'étude particulièrement en Mai. Par contre en hiver et en mi saison, les gains internes sont les plus influents tandis qu'au mois de mai, se sont les gains externes qui provoquent la surchauffe surtout dans les salles orientées vers l'Ouest.

Tableau 1: résumé statistique des variables objectives relevées durant les trois périodes.

Période	Variable objective	Max	Min	Moy
Hiver	Top (°C)	26.3	16.8	22.44
	HR (%)	48	23	34.56
	Vair (m/s)	0.69	0	0.06
Mi saison	Top (°C)	25.95	16.95	22.91
	HR (%)	42	20.1	29.83

	Vair (m/s)	0.63	0	0.09
Période chaude	Top (°C)	28.8	21.65	25.47
	HR (%)	42.8	16.6	30.47
	Vair (m/s)	1.44	0	0.16

5.2-Perception de l'environnement thermique:

1221 questionnaires longitudinaux ont été recueillis à travers les trois périodes d'investigation soit 569 en hiver, 382 en mi saison et 270 en période chaude (mois de Mai). 63% des répondants sont de sexe féminin et 97% d'entre eux sont des étudiants dont l'âge varie entre 18 et 45 ans. Seulement 3% sont des enseignants.

Les valeurs moyennes de l'Impédance thermique du vestiaire I_{ci} calculées à partir du questionnaire sont: 1.4 Clo en hiver, 1.2 Clo en mi-saison et 0.7 Clo en Mai.

Les figures 3, 4 et 5 représentent le vote de sensation thermique des occupants sur l'échelle de sept points de l'ASHRAE de chaque période. Durant les trois périodes étudiées, les usagers ont exprimé une Sensation Thermique moyenne se situant entre neutre (0), légèrement chaud (+1) et chaud (+2). Mais la majorité des votes indiquent une sensation thermique « neutre » (61% en hiver, 57.3% en mi saison et 50.7% en Mai).

En hiver (Fig.3), la sensation thermique « chaud » représente 32.8% des votes tandis que la sensation « froid » n'a été évoquée que par 6 % des répondants. Le pourcentage de Satisfaction, qui correspond selon la théorie de Fanger [3] à la somme des votes (+1,0,-1) est égale à 80.5%, alors que celui des insatisfaits, qui correspond à la somme des votes (+2,+3) et (-2,-3) est égale à 19.5%.

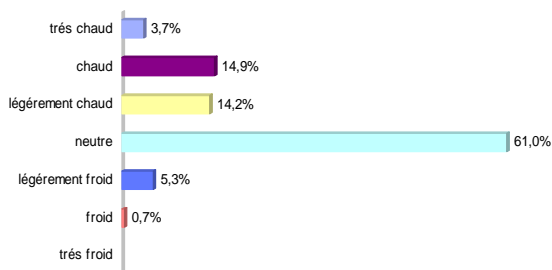


Fig 3: Vote de sensation thermique sur l'échelle de 7 points de ASHRAE en hiver (N=569)

En mi saison (fig.4), la sensation thermique « chaud » est plus importante (36.1% des votes) . Le pourcentage de Satisfaction est cependant légèrement plus élevée (83.4%) tandis que le pourcentage d'insatisfaits est égale à 16.6%.

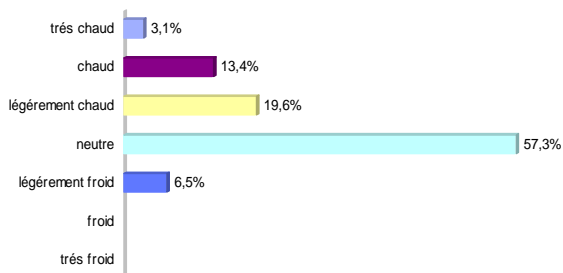


Fig 4: Vote de sensation thermique sur l'échelle de 7 points de ASHRAE en mi saison (N=382)

En Mai (fig.5), la sensation thermique « chaud » a été exprimée par 47.8 % des votants. Cependant, le pourcentage de Satisfaction avait diminué pour atteindre les 75.9% alors que celui des insatisfaits, correspondant à la somme des votes (+2,+3) avait enregistré une hausse, soit 24.1%.

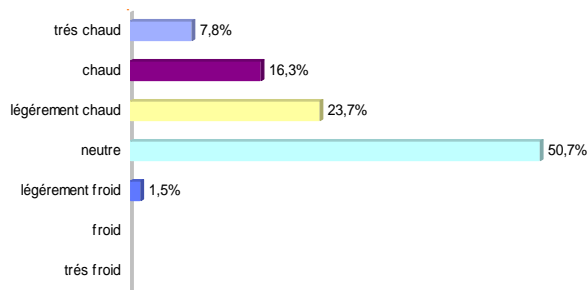


Fig 5 : Vote de sensation thermique sur l'échelle de 7 points de ASHRAE en Mai (N=270)

5.3-Acceptabilité de l'environnement thermique des salles de cours:

Le standard 55 de ASHRAE [1] indique les conditions pour les-quelles plus de 80% des occupants ont trouvé l'environnement thermique "acceptable". Dans cet article, l'acceptabilité thermique est analysée en fonction de quatre critères qualitatifs (vote direct "acceptable", somme des votes +1,0,-1, vote de sensation thermique "neutre" et vote de préférence thermique "aucun changement) et deux critères quantitatifs (PMV et Top). Les figures 6 et 7 montrent le degré d'acceptabilité de l'environnement thermique des salles de cours par saison.

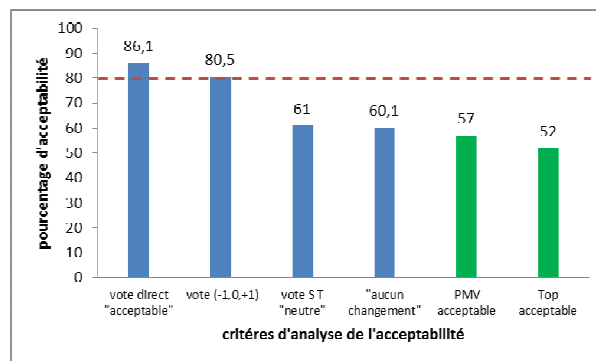


Fig 6 : Acceptabilité de l'environnement thermique en hiver.

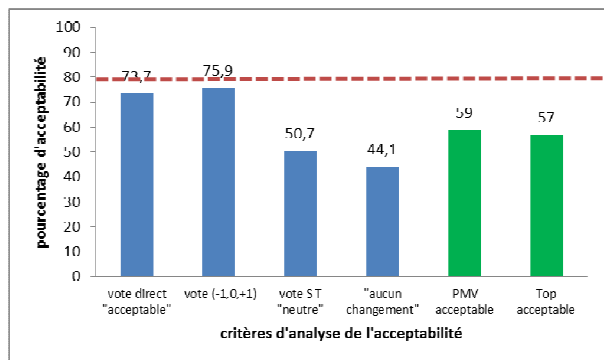


Fig 7

7: Acceptabilité de l'environnement thermique en période chaude (Mai).

D'après les figures 6 et 7, le niveau le plus élevé d'acceptabilité est celui obtenu par le vote direct « acceptable » des occupants qui montre qu'en hiver par exemple, 86.1% trouvent l'environnement thermique acceptable.

-Par convention, les sensations thermiques « légèrement froid (-1), neutre (0) et légèrement chaud (+1) » sont considérées comme les sensations thermiques ressenties dans un environnement thermique acceptable [33]. Selon ce second critère qualitatif, le niveau d'acceptabilité de l'environnement en hiver est de 80.5 %, soit légèrement inférieur à celui obtenu par le vote direct des occupants. Ceci confirme que certains sujets ayant voté en dehors des trois points centraux de l'échelle de sensation thermique trouvent leur environnement thermique « acceptable », comme l'a souligné Von Grabe et Winter [23], Hwang [34], Wong [35] et Celis Mercier [36].

-D'autre part, la température de confort idéale est traditionnellement définie comme étant celle qui provoque une sensation thermique « neutre » chez un groupe d'individus [37]. Or dans notre étude, il est ressorti d'après ce troisième critère qualitatif que l'environnement thermique n'est pas acceptable ni en hiver ni en Mai, puisque seulement 61 % et 50.7% des occupants ont témoigné avoir ressenti une sensation thermique « neutre ».

-Quant au vote de préférence thermique « sans changement » (quatrième critère qualitatif), il a également démontré que l'environnement thermique n'est pas acceptable dans les deux périodes (60.1% et 44.1%). Ceci montre que l'intervalle d'acceptabilité dans le subconscient des usagers est plus large que celui de la préférence thermique. Ces mêmes résultats ont été obtenus dans des études similaires [34,35].

D'autre part, les critères quantitatifs qui sont la température opérative Top et le vote moyen prévisible PMV, sont également loin de refléter la perception des usagers puisqu'en hiver, seulement 52% des Top s'inscrivent dans l'intervalle de confort (17.5-22.5°C) calculé selon le standard 55 de ASHRAE [1] dans les bâtiments ventilés naturellement. De même que pour le PMV, 57% des valeurs sont comprises entre -0.5 et +0.5, critères d'acceptabilité pour les bâtiments de catégorie 3 (bâtiments existants) [4].

En conclusion, et d'après les réponses subjectives des usagers, l'environnement thermique des salles de cours est

« acceptable » en hiver et en mi saison, mais « inacceptable » durant le mois de Mai.

5.4-Le Vote Moyen Actuel AMV et la température neutre Tn:

La température neutre T_n peut être déduite du modèle de régression linéaire obtenu par le vote de sensation thermique sur l'échelle des sept points de l'ASHRAE avec la température opérative relevée au même moment (Figure 8,9 et 10).

Les équations de régression linéaire obtenues sont les suivantes:

En hiver:

$$AMV = 0.1944 \text{ Top} - 4.0303 \dots \dots \dots (\text{Equation 3})$$

En mi- saison:

$$AMV = 0.1558 \text{ Top} - 3.2715 \dots \dots \dots (\text{Equation 4})$$

En Mai:

$$AMV = 0.2837 \text{ Top} - 6.6505 \dots \dots \dots (\text{Equation 5})$$

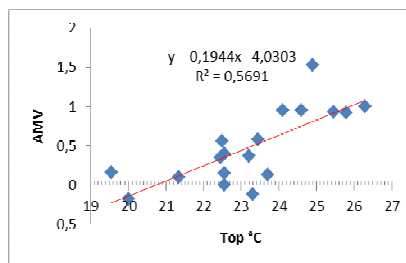


Fig 8: Vote Moyen Actuel / Température opérative en hiver.

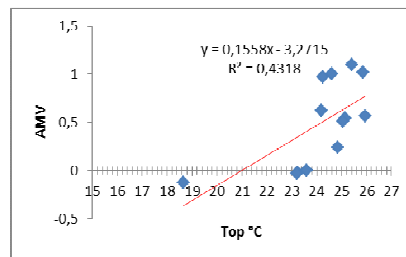


Fig 9: Vote Moyen Actuel / Température opérative en mi-saison.

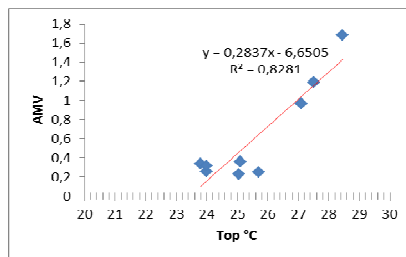


Fig 10 : Vote Moyen Actuel/ Température Opérative en période chaude.

De ces équations, on a déduit que la température neutre T_n (AMV=0) varie entre 20.73°C en hiver (intervalle de confort 16.35-25.10°C) , 21°C en mi-saison et 23.44°C en Mai (intervalle de confort 20.44-26.43°C).

-Les températures neutres obtenues pour Constantine en hiver et en période chaude sont proches de celles obtenues dans l'étude entreprise par Cena et de Dear [10] à

Kalgoorlie-Boulder en Australie dans des bureaux. Ils ont obtenu une zone de confort comprise entre 22 et 25°C (température effective) avec une température neutre en termes de température opérative égale à 20.4 °C en hiver et 23.3°C en été.

Elles sont proches également des résultats des études menées en Tunisie et en Lybie [15,16] où la zone de confort a été située entre 16 et 26.5 °C pour toute l'année. Soulignons que les trois pays sont voisins et possèdent non seulement le même climat mais également une même culture.

Par contre, cette température est inférieure aux résultats d'autres recherches menées dans d'autres régions à climat chaud et sec:

- Au Pakistan [17], la zone de confort a été comprise entre 21 et 31 °C (température globe).

- Au Caire (Egypte), il a été relevé une température neutre légèrement plus élevée en période chaude (24.5 °C) dans des espaces d'enseignement universitaires ventilés naturellement [11].

-L'étude menée au Kuwait [12] exclusivement dans des bureaux climatisés a donné une température neutre encore plus importante (25.2 °C).

-Alors qu' à Ghadames en Lybie [13,14] où des études ont inclus à la fois des bâtiments ventilés naturellement ainsi que des bâtiments climatisés mécaniquement, la Tn relevée est la plus élevée. En effet, dans les bâtiments ventilés naturellement, la zone de confort a été comprise entre 30.8 et 32.5 °C avec une température neutre égale à 31.6 °C. Tandis que dans les bâtiments modernes avec air conditionné, les usagers étaient « neutres » entre 25 et 31 °C de température globe.

Ces valeurs importantes peuvent s'expliquer par le fait que l'étude a été menée durant la saison estivale (juillet et aout) et que les occupants des bureaux climatisés ne vivent pas dans des espaces conditionnés.

5.5-le Vote Moyen Prévisible PMV:

Les régressions linéaires (Equations 6,7 et 8) obtenues par la corrélation entre la variable objective PMV et la température opérative Top relevée par la station microclimatique indiquent que la température neutre Tn (PMV=0) varie entre 20.11°C en hiver, 21.29 °C en mi saison et 24.21°C en période chaude (Mai).

En hiver: $PMV = 0.2008 Top - 4.0383$(Equation 6)

En mi- saison: $PMV = 0.2222 Top - 4.731$...(Equation 7)

En Mai: $PMV = 0.2751 Top - 6.6616$(Equation 8)

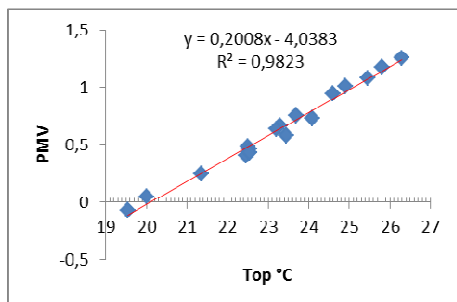


Fig 11: Vote Moyen Prévisible/ Température Opérative en hiver.

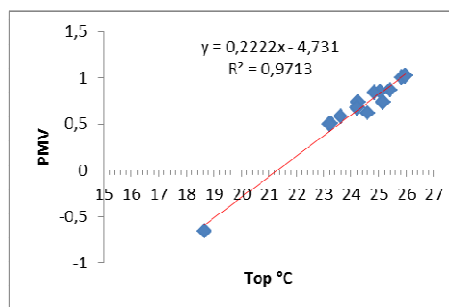


Fig12 : Vote Moyen Prévisible/ Température Opérative en mi- saison.

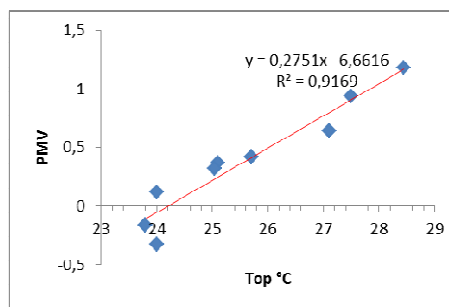


Fig.13 : Vote Moyen Prévisible/ Température Opérative en période chaude.

En comparant ces valeurs avec celles issues du Vote Moyen Actuel (AMV), on remarque que la Tn obtenue par le PMV en hiver est inférieure de 0.6°C par rapport à celle obtenue par le AMV, mais qu'elle est supérieure à celles obtenues en mi saison et en Mai (différence de 0.3 °C et 0.77°C).

De ce fait, on peut conclure que le PMV surestime la sensation thermique en hiver et la sou-estime en période chaude (figures 14 et 15).

En effet, la régression linéaire (Equ.9) obtenue par la corrélation entre le PMV et le AMV pour la période hivernale (Fig. 14) indique que lorsque AMV= 0, PMV= + 0.338.

$PMV = 0.5941 AMV + 0.3385$ (Equation 9)

Alors que la régression linéaire (Equ.10) obtenue par la corrélation entre le PMV et le AMV pour la période chaude (Fig. 15) indique que lorsque AMV= 0, PMV= -0.094.

$PMV = 0.776 AMV - 0.094$ (Equation 10)

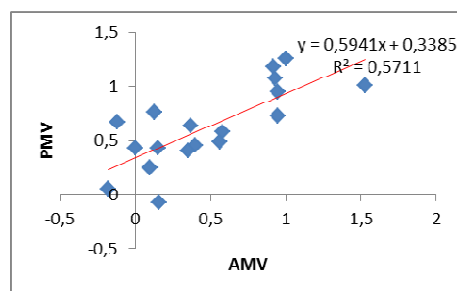


Fig. 14 : Vote Moyen Prévisible/Vote Moyen Actuel en hiver.

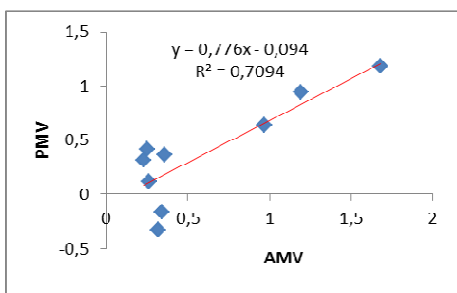


Fig. 15 : Vote Moyen Prévisible/Vote Moyen Actuel en période chaude.

5.6-Le pourcentage actuel d'insatisfaits APD et le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD:

La figure 16 montre le pourcentage d'insatisfaits en fonction de la température opérative, comme indiqué par les diverses méthodes d'évaluation de l'acceptabilité. Les trois courbes (PPD, APD et la somme des votes ±2 et ± 3 de ASHRAE désignée par PD) se coupent à environ 21°C. En dessous de cette température, le PPD sous-estime le pourcentage de personnes qui expriment leur insatisfaction, car en basses températures, le modèle PMV prédit un inconfort « légèrement chaud » au moment où les répondants estiment qu'il fait « froid ».

Entre 21°C et 25°C, la tendance s'inverse: le PPD sur estime le pourcentage d'insatisfaits. Au-delà de 25°C, le PPD sous-estime de nouveau le pourcentage d'insatisfaits car au moment où les occupants votent « chaud et très chaud », le PMV prédit des sensations plus basses. Donc à des températures inférieures à 21°C et supérieures 25°C, le pourcentage actuel d'insatisfaits est plus important.

D'autre part, l'échelle de sensation thermique de ASHRAE surestime l'insatisfaction des occupants car un grand pourcentage de personnes qui ont voté « froid » ou « chaud » trouvent ces sensations thermiques acceptables comme le démontre le vote direct d'acceptabilité.

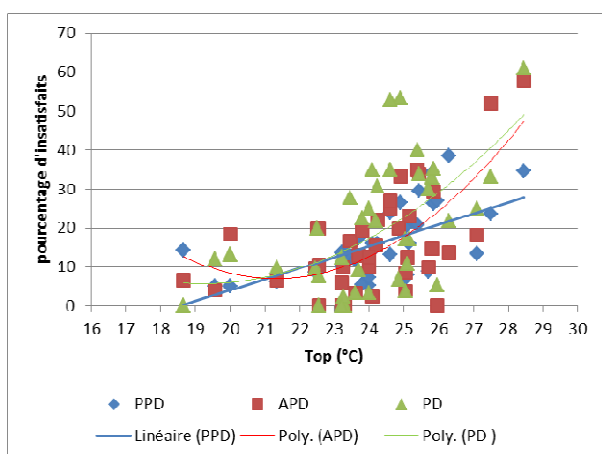


Fig.16: Insatisfaction de ussagers/ Top.

5.7-Comparaison entre le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits APD et le PPD prévu par la norme ISO 7730:

Nous avons comparé le pourcentage d'insatisfait PPD prévu par la norme ISO 7730 avec le Pourcentage Actuel d'insatisfaits APD exprimé par les répondants qui correspond au vote direct 'inacceptable' en fonction de la sensation thermique et ce pour les trois périodes étudiées (figures 17,18 et 19). De cette comparaison il est ressortie les résultats suivants:

-D'une manière générale, l'évaluation des occupants suit la même tendance que les prévisions du PPD, à savoir que le niveau d'insatisfaction est moins élevé lorsque la sensation thermique est neutre mais qu'elle augmente quand la sensation thermique se dirige vers le chaud ou vers le froid. Toutefois, les graphes montrent des écarts significatifs lorsque cette meme sensation est différente de neutre, et plus particulièrement lorsque'elle tend vers le chaud.

-En effet, il s'est avéré qu'en hiver (Fig.17), le APD exprimé par les usagers ayant voté « légèrement chaud » (19.8%), « chaud » (35.3%) et « très chaud » (61.9%) sont nettement plus bas que le PPD prévu par la norme ISO 7730 (26%, 77% et 100% respectivement). Par contre, le APD exprimé par les usagers ayant voté « légèrement froid » (33.3%) est plus élevé que le PPD prévu (26%) tandis que le APD exprimé par les usagers ayant voté « froid » ou « très froid » est très proche ou égal au PPD prévu. Ceci suggère que pendant la saison froide, les sensations thermiques chaudes sont appréciées et même préférées par les répondants, comme l'as souligné Corgnati [20,21], tandis que les sensations froides sont totalement inappréciées.

-En revanche en mi saison (Fig.18), on a note que les sensations chaudes sont moins appréciées qu'en période hivernale car on a relevé une augmentation des pourcentages d'insatisfaits: 21.3% pour la sensation « légèrement chaud », 58.8% pour « chaud » et 75% pour « très chaud ». Tandis que la sensation « légèrement froid » est appréciée (16% d'insatisfaits seulement contre 26% prévu par la norme ISO 7730).

-Enfin, en période chaude (mois de Mai), l'écart entre le PPD et le APD se réduit considerablement puisque pour la sensation thermique « légèrement chaud », le APD (39.1%) est devenu plus important que le PPD prévu. Mais le pourcentage d'insatisfaits exprimé pour les sensations « chaud » et « très chaud » reste moins important que le PPD prévu. Pour la sensation « légèrement froid », le pourcentage d'insatisfaits est nul (Fig.19): ce qui veut dire qu' en saison chaude, les sensations froides sont mieux appréciées par les occupants, par contre les sensations chaudes sont moins appréciées.

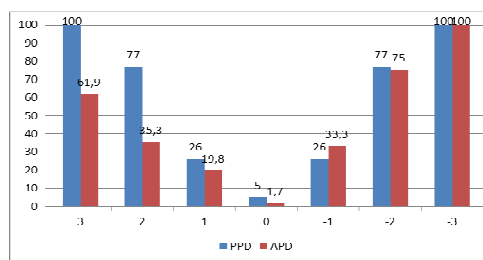


Fig 17: APD et PPD en fonction de la sensation thermique en hiver.

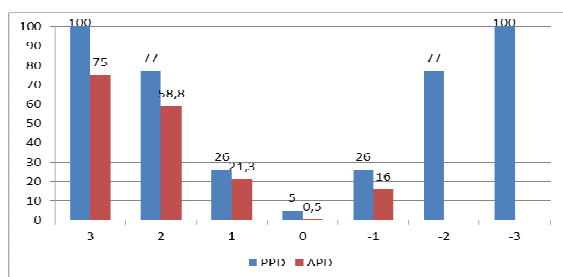


Fig 18: APD et PPD en fonction de la sensation thermique en mi-saison.

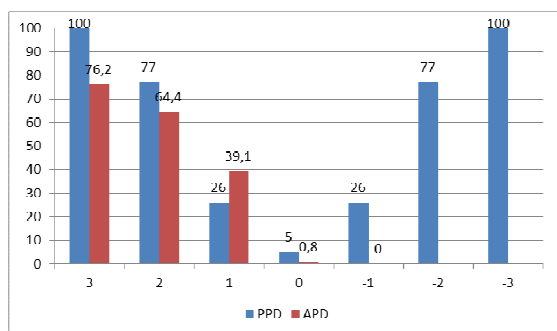


Fig 19: APD et PPD en fonction de la sensation thermique en période chaude (Mai).

-Cette analyse permet de déduire que les occupants ont une plus grande tolérance aux sensations thermiques que ne le prévoit la norme ISO 7730, ce qui peut s'expliquer par le fait que:

- 1- Les occupants acceptent des sensations thermiques variées, principalement le chaud en hiver.
- 2- Les actions adaptatives menées pour améliorer leur confort, amplifient leur niveau de tolérance envers des sensations thermiques autres que "neutre".

La première hypothèse est basée sur les résultats d'études empiriques et de laboratoire: en effet, les résultats d'expérimentations en chambre climatique réalisées par Knudsen et Fanger [37] concluent que la sensation thermique devient neutre plus rapidement lorsque la sensation thermique est chaude que lorsque la sensation thermique est froide. Autrement dit, leur étude suggère que l'être humain s'adapte plus facilement au chaud qu'au froid. Quant à la deuxième hypothèse, elle est basée sur les résultats d'études empiriques qui montrent que l'exercice d'actions adaptatives entraîne une augmentation de la tolérance vis-à-vis des variations climatiques [6].

6. Conclusion:

-Les salles de cours investiguées dans notre étude sont caractérisées par un environnement thermique chaud et sec, acceptable en hiver et en mi saison, et plutôt inacceptable en saison chaude.

-Cette étude a démontré qu'il n'y a pas une température neutre unique pour une même population: celle-ci évolue à travers les saisons. Ainsi, la température neutre déterminée à partir du vote moyen actuel AMV varie entre 20.73°C en

hiver, 21°C en mi saison et 23.44°C en période chaude (mai)

-Il y a une évolution de la préférence thermique des usagers entre les saisons car nous avons constaté que les occupants préfèrent les sensations thermiques chaudes en hiver tandis que les sensations froides sont inacceptables durant cette période. Par contre, ils préfèrent les sensations thermiques froides en période chaude.

-Le Vote Moyen Prévisible PMV surestime la sensation thermique en hiver et la sous-estime en période chaude.

-Le PPD et le APD divergent. Cependant, l'échelle de ASHRAE surestime l'insatisfaction des occupants car un grand pourcentage de personnes qui ont voté « froid » ou « chaud » trouvent ces sensations thermiques acceptables.

-La norme ISO 7730 n'est pas applicable dans cette étude puisque les occupants ont affiché une plus grande tolérance aux sensations thermiques que ne le prévoit cette norme.

Remerciements

Nous tenons à remercier le Doyen de la faculté de psychologie de Constantine qui nous a ouvert les portes de son établissement afin de réaliser notre investigation. De même que je remercie vivement l'ensemble des enseignants et des étudiants, tous cycles confondus de la faculté, qui ont accepté de participer à cette enquête et sans lesquels ce travail de recherche n'aurait pas pu aboutir.

References

- [1] ASHRAE Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2004.
- [2] World Health Organization (WHO). Health is a state of complete physical, mental and social well being and not merely the absence of disease or infirmity. WHO Basic documents. 42nd ed. Geneva: World Health Organization; 1999.
- [3] Fanger PO. Thermal comfort-analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.
- [4] ISO7730. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva: International Standards Organization; 1984.
- [5] Nicol JF, Humphreys MA. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy Build 2002; 34(6):563-72.
- [6] Brager GS, de Dear RJ. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy Build 1998; 27(1):83-96.
- [7] Ogbonna AC, Harris DJ. Thermal comfort in sub-Saharan Africa: field study report in Jos-Nigeria. Appl Energy 2008; 85(1):1-11.
- [8] Van Hoof J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? Indoor Air 2008;18:182-201.
- [9] Nicol F, Humphreys M, Roaf S. Adaptive thermal comfort. Principles and practice. New York: Routledge Taylor & Francis Group; 2012.
- [10] Cena K, de Dear R. Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate. J Therm Biol 2001; 26(4): 409-14.
- [11] Farghal A, Wagner A. Studying the adaptive comfort approach within a hot dry climate: a case study in educational buildings in the Egyptian climate. In: Proceedings of conference air conditioning and the low carbon cooling challenge, Windsor, 2008. NCEUB; 2008.
- [12] Al-ajmi FF, Loveday DL. Indoor thermal conditions and thermal comfort in air-conditioned domestic buildings in the dry-desert climate of Kuwait. Build Environ 2010; 45(3):704-10.

- [13] Taki AH, Ealiwa MA, Howarth AT, Seden MR. Assessing thermal comfort in Ghadames, Libya: application of the adaptive model. *Build Serv Eng Res Technol* 1999; 20(4):205-10.
- [14] Ealiwa MA, Taki AH, Howarth AT, Seden MR. An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya. *Build Environ* 2001;36(2):231-7.
- [15] Akair A, Bánhidi L. Thermal comfort investigation in Libya. *Mech Eng* 2007; 51(1):45-51.
- [16] Bouden C, Ghrab N. An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: a field study results. *Energy Build* 2005; 37(9):952-63.
- [17] Nicol JF, Raja IA, Allaudin A, Jamy GN. Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects. *Energy Build* 1999;30(3):261-79.
- [18] M'Sellem H. et Alkama D. Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec-. *Revue des Energies Renouvelables* 2009 ; vol.12 N°3, 471-488.
- [19] Pepler, R.D., Warner, R.E.. Temperature and learning: an experimental study. *ASHRAE Trans.* 1968 ; 74 (2) :211-224.
- [20] Corgnati, S. P., Filippi, M., et Viazzo, S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort, *Building and Environment* 2007; 42: 951-959
- [21] Corgnati, S.P., Ansaldi, R., et Filippi, M. Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid-seasons: assessment through objective and subjective approaches, *Building and Environment* 2009, 44:785-792.
- [22] Mayer, E. A new correlation between predicted mean vote (PMV) and predicted percentage of dissatisfied (PPD). In: *Healthy Buildings/LAQ '97 International Congress; Proc. Int. Conf. Washington, 27 September/02 October 1997.*
- [23] Von Grabe, J., Winter, S. The correlation between PMV and dissatisfaction on the basis of the ASHRAE and the McIntyre scale d towards an improved concept of dissatisfaction. *Indoor Built Environ.*2008; 17 (2), 103-121.
- [24] Buratti C, Ricciardi P. Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: correlation between experimental data and mathematical models. *Building and Environment* 2009;44:674-87.
- [25] Mors, S., Hensen, J., Loomans, M., Boerstra, A. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: creating and validating PMV-based comfort charts. *Build. Environ.* 2011; 12: 2454-2461.
- [26] De Giuli, V., Zecchin, R., Corain, L., Salmaso, L. Measurements of indoor environmental conditions in Italian classrooms and their impact on children's comfort. *Indoor Built Environ.* 2014.
- [27] Maria Anna Nico, Stefania Liuzzi, Pietro Stefanizzi. Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis, *Applied Ergonomics.*2015; 48: 111-120
- [28]Koppen, W., Geiger, R.. *Handbuch der Klimatologie.* Gebrüder Borntraeger, Berlin; 1930.
- [29] EN ISO 7726. Ergonomics of the Thermal Environment e Instruments for Measuring Physical Quantities. International Standardisation Organisation, Geneva, 2001.
- [30] EN ISO 9920. Ergonomics of the Thermal Environment e Estimation of Thermal Insulation and Water Vapour Resistance of a Clothing Ensemble. International Standardisation Organisation, Geneva, 2009.
- [31] Olesen. A New Simpler Method for Estimating the Thermal Insulation of a Clothing Ensemble 1985 p484.
- [32] EN ISO 10551. Ergonomics of the thermal environment. Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales.
- [33] de Dear, R.J., G.S. Brager and D.J. Cooper, *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference - Final Report, ASHRAE RP-884.* Sydney:MRL 1997.
- [34] Hwang, R., Lin, T. et Kuo, N. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan. *Energy and Buildings* 2006, 38: 53-62.
- [35] Wong, N., et Khoo, S.S. Thermal comfort in classrooms in the tropics, *Energy and Buildings* 2003, 35: 337-351.
- [36] Celis: Mercier Sitvestre, Potvin André, Demer.s: Claude. The 'Pleasant' Temperature: Window Manipulation and Dynamics of Thermal Comfort in a. Naturally Conditioned Space. In *Proceeding PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22-24 October 2008.*
- [37] Knudsen, H.N. et Fanger, P.O. The Impact of Temperature Step-Changes on Thermal Comfort. *Proceedings of INDOOR AIR 1990,* Toronto, Canada, (1):757-761.