

Capteur multifonctions pour l'évaluation du confort thermique dans les bâtiments

William MAKONDO^{1,3}, Abdelatif MERABTINE^{1,2}, Sandrine PINCEMIN^{1,3}, Antoine GADEMER¹, Jean PODLECKI³, Ricardo GARCIA³

¹EPF Ecole d'ingénieur – 21 boulevard Berthelot 3400 Montpellier

² CREIDD/ICD/UMR-CNRS Sciences et Technologies de la Maîtrise des Risques, Université de Technologie de Troyes, 12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes

³IES UMR 5214 UM2, 860 rue Saint Priest, Bât 5 - CC 0500134095 Montpellier Cedex 5

* (auteur correspondant : abdelatif.merabtine@epf.fr)

Résumé - En France, de tous les secteurs économiques, le secteur du bâtiment est le plus consommateur d'énergie (43% des consommations énergétiques françaises soit 1,1 tonne équivalent pétrole par an et par habitant) et par conséquent le plus émetteur de gaz à effet (25% des émissions nationales). Or, dans un contexte où les ressources s'épuisent, où le prix des énergies s'envole et où les changements significatifs du climat provoquent des phénomènes graves, il est nécessaire de développer une nouvelle approche énergétique pour ce secteur. C'est dans cette vision que la France s'est engagée dans le plan climat en 2004, les plans Grenelle I et II, le programme européen efficacité énergétique ou encore la loi sur la transition énergétique intervenue au premier semestre 2013 qui vise à réduire de 20% la consommation énergétique d'ici 2030 et ainsi agir tant sur l'efficacité énergétique des bâtiments (neufs ou anciens) que sur l'impact CO₂ de ces derniers.

Des mesures significatives ont été alors mises en place afin d'encourager le développement d'outils, numériques et expérimentaux, pour la conception et la rénovation des bâtiments selon les critères de la basse consommation. Toutefois, malgré ces efforts, on constate que l'utilisateur, en tant que système associé au bâtiment, est mal représenté voire pas pris en compte notamment en phase de conception. Ce vecteur social, qui vient de s'ajouter aux deux préoccupations environnementale et économique de ce secteur, concerne principalement le ressenti et le confort thermique. Dans un souci de répondre à cet enjeu, l'IES (Institut d'Électronique et des Systèmes) a développé un capteur multifonctions permettant à la fois de mesurer les paramètres physiques dans un bâtiment mais aussi d'évaluer le niveau de confort thermique de l'utilisateur via une interface conviviale. Deux indicateurs sont alors estimés, le PMV (Predicted Mean Vote) et le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Il s'agit de deux indices permettant de prédire le niveau moyen de confort définis dans le cadre de la norme NF EN ISO 7730. Cette étude quantitative sera confrontée à une étude qualitative (sondage) permettant la validation de l'outil expérimental. L'évaluation du niveau de confort permet non seulement de savoir comment l'améliorer mais aussi de quantifier les ressources énergétiques à employer pour l'entretenir. Les mesures in-situ seront réalisées au sein du bâtiment BBC de l'EPF école d'ingénieur-e-s à Troyes.

Cette étude devrait évoluer vers une synchronisation de l'outil avec la GTB (Gestion technique du bâtiment) du bâtiment étudié afin d'informer en temps réel les usagers du niveau de confort thermique et de la consommation énergétique du bâtiment. Ces deux paramètres seront nécessaires à l'évaluation de l'efficacité énergétique du bâtiment étudié.

Nomenclature

f_{cl}	facteur de réduction des échanges convectifs par les vêtements du vêtement, clo	<i>Symboles grecs</i>	Φ	densité de flux de chaleur, W/m^2
h_c	coefficient d'échange par convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	a	air ambiant
I_{cl}	degré d'isolation thermique	cd	conduction	
M	chaleur dégagée pendant l'exercice, $W.m^{-2}$	cl	vêtement	
P	pression partielle de vapeur d'eau, Pa	cv	convection	
T	température, K	e	évaporation	
\bar{T}	température moyenne, K	m	matériau en contact	
V_{ar}	vitesse relative de l'air, $m.s^{-1}$	r	radiatif/radiante	
W	travail $W.m^{-2}$	res	respiration	
		tot	total	

1. Introduction

Le secteur du bâtiment représente un des secteurs économiques les plus consommateurs d'énergie avec un impact environnemental considérable. En effet, des mesures incitatives ont été mises en place par l'Etat afin d'encourager la construction des bâtiments à basse consommation. Aussi, des travaux de recherche ont été menés pour développer des outils numériques et expérimentaux plus adaptés à la nouvelle réglementation thermique 2012 et qui prennent davantage en considération des aspects énergétiques et économiques.

Toutefois, malgré ces efforts, on constate que certains sous-systèmes associés au bâtiment sont mal représentés voire non pris en compte en phase de conception. On peut citer les problématiques liées au ressenti et au confort humain ainsi que les scénarii d'usage du bâtiment. Ainsi, deux points de vue s'opèrent, l'intégration de l'occupant en tant qu'usager ou opérateur qui définit ces scénarii et en tant qu'habitant subissant leurs effets [1,2].

Le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur [3]. L'étude du confort peut se faire grâce à des méthodes basées sur des indices environnementaux simples (températures opérative, équivalente et effective). Des modèles analytiques tels que celui de Fanger (PMV et PPD), de Gagge et de Stolwijk ont aussi été développés en réponse aux besoins du secteur du bâti [4].

Le confort thermique est une des notions subjectives qu'il est aujourd'hui important de pouvoir quantifier. Les normes actuelles en effet prennent en compte les approches analytiques du confort thermique. Pour répondre à ce besoin de quantification, un capteur multifonctions a été développé au sein du laboratoire de l'IES. Il mesure, en un seul point, des données d'ambiance relatives à l'environnement choisi. Par la prise en compte des paramètres physiques, ledit capteur peut évaluer ces données en termes d'indices de confort, présentés dans la norme ISO 7730. Une interface utilisateur permet de fournir les différents paramètres et de visualiser l'évolution en temps réel des indices de confort.

Dans ce travail nous allons nous pencher sur un des aspects qui traite de la subjectivité de l'usager dans le processus de conception. L'étude dont traite ce document rentre dans le cadre de la validation de l'outil de mesure par des données qualitatives. La phase de développement étant achevée, le capteur a été testé pour évaluer ses performances en termes de caractérisation du confort thermique. Une application au bâtiment s'impose dès lors. A noter qu'il ne sera pas abordé dans cette contribution le facteur psychique humain dans la modélisation analytique du confort thermique ce qui nous amènera à justifier une sorte de divergence entre les résultats numériques et expérimentaux.

2. Echanges thermiques et confort thermique

Habituellement un être humain sain maintient sa température entre 36,7 et 37,1°C. Cette température, dans de nombreuses situations est supérieure à la température d'ambiance. Afin de maintenir cette stabilité corporelle il doit y avoir un équilibre entre la production de chaleur interne (métabolisme de base), le travail physique et les échanges thermiques avec le milieu extérieur qui s'effectuent par conduction, convection, rayonnement, évapotranspiration et lors de l'ingestion de nourriture.

Cet équilibre peut être représenté par une somme algébrique des différents échanges thermiques du système qui est dans notre cas le corps humain. Le bilan thermique s'écrit alors comme suit :

$$\Phi_{tot} = \Phi_{cd} + \Phi_{cv} + \Phi_e + \Phi_r + \Phi_{cv_{res}} + \Phi_{e_{res}} \quad (1)$$

avec :

Φ_{cd} densité de flux de chaleur par conduction à travers la peau humaine (W/m²)

Φ_{cv} densité de flux de chaleur par convection via la surface de la peau (W/m²)

Φ_e densité de flux de chaleur par évaporation via la surface de la peau (W/m²)

Φ_r densité de flux de chaleur par rayonnement (W/m²)

$\Phi_{cv_{res}}$ densité de flux de chaleur par convection via les voies respiratoires (W/m²)

$\Phi_{e_{res}}$ densité de flux de chaleur par évaporation via les voies respiratoires (W/m²)

Au repos, toute l'énergie due au métabolisme est transformée en chaleur et on a donc :

$$\Phi_{tot} = M \quad (2)$$

Par contre en situation de travail, la chaleur est produite en tenant compte du travail mécanique cédé à l'extérieur et on a donc :

$$\Phi_{tot} = M - W \quad (3)$$

Le confort désigne l'état de satisfaction d'un individu vis-à-vis de son environnement. Il est plus souvent caractérisé par contre-mesure grâce au taux d'insatisfaction des individus [3]. Hormis les paramètres humains qui influencent le confort (tenue vestimentaire, activité métabolique, etc.), des paramètres physiques d'ambiance ont une influence reconnue sur le niveau de confort. Deux indices de confort ont été établis par la norme ISO 7933, PMV et PPD.

Le PMV (Predicted Mean Vote) est un indice basé sur une échelle de 7 valeurs subjectives (+3 pour très chaud à -3 pour très froid) permettant de prédire le niveau de confort thermique dans un environnement (Tableau 1). A partir des paramètres humains (M, I_{cl}) et des paramètres environnementaux (T_a, T_r, V_{ar}, P_{aH2O}) le calcul du bilan thermique des conditions utilisées permet d'obtenir le modèle empirique suivant :

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) [(M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - P_{aH2O}\} - 0,42 \{(M - W) - 58,15\} - 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - P_{aH2O}) - 0,0014M(34 - T_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl}(T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (4)$$

T_{cl}, température du vêtement, est approchée par le calcul itératif suivant :

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - 0,155I_{cl} [3,96 \times 10^{-8} f_{cl}(T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (5)$$

avec :

$$h_c = \max(2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25}; 12,1\sqrt{V_{ar}})$$

$$f_{cl} = 1,00 + 0,2I_{cl} \text{ pour } I_{cl} \leq 0,5clo$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1I_{cl} \text{ pour } I_{cl} > 0,5clo$$

Le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) quant à lui permet de déterminer un pourcentage d'individus insatisfaits. Le PPD peut être corrélé au PMV par la relation suivante :

$$PPD = 1 - 0,95 \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (6)$$

+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Légèrement chaud
0	Neutre
-1	Légèrement froid
-2	Froid
-3	Très froid

Tableau 1 : Echelle de valeurs numérique associées aux sensations de confort

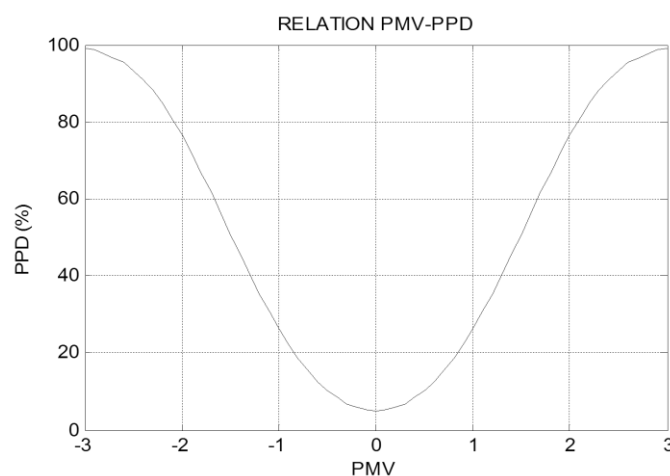


Figure 1 : PPD en fonction du PMV

3. Présentation du capteur

Le capteur multifonction qui fait l'objet de notre étude a pour principal avantage de réaliser simultanément plusieurs mesures physiques de l'environnement étudié (température, humidité, etc.) ce qui lui permet de calculer et d'afficher en temps réel les indices de confort thermique PMV et PPD. Cette partie détaillera le fonctionnement de ce capteur.

3.1 Grandeurs mesurées

Dans le tableau suivant sont présentées les différentes grandeurs physiques mesurées, en les regroupant suivant le domaine de confort qu'elles permettent d'étudier.

Types de confort	Grandeurs physiques	Technologie utilisées	Caractéristiques
Thermique	Température Ambiante	Type band gab	-40 à 123,8°C Précision : $\pm 0,4^\circ\text{C}$
	Température radiante	Sonde Pt100	0 à 100°C Précision : $\pm 0,4^\circ\text{C}$
	Humidité relative	Capacité (détection de polymère)	0 à 100%RH Précision : $\pm 3,0\%RH$
	Vitesse de l'air	Sonde à fil chaud	0,05 à 5 m.s ⁻¹ Précision : $\pm 0,05$ m/s (0 ~ 1m/s) $\pm 0,15$ m/s (1 ~ 5m/s)

Types de confort	Grandeurs physiques	Technologie utilisées	Caractéristiques
Respiratoire	Taux de CO ₂	Capteur optique	0,0 – 2000 ppm Précision : ± 30 ppm ± 3%
Visuel	Eclairage lumineux	Photodiodes	-

Tableau 2 : grandeurs mesurées par le capteur

3.2 Mode de transmission et traitement des données

Le capteur est composé de deux cartes électroniques : une carte d'acquisition reliée aux différents capteurs et une carte mère pour les calculs et la communication sans fil (ZigBee, 2.4Ghz) avec l'ordinateur servant de poste de récupération.

Lors de la collecte de données, les mesures effectuées par les différentes sondes sont envoyées au PC sous forme de trames de données.

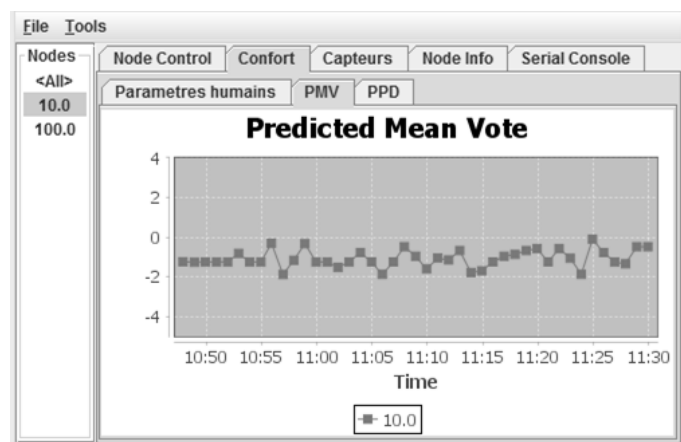
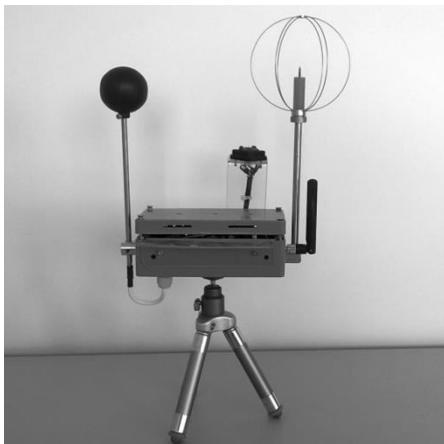


Figure 2 : Le capteur multifonction

Figure 3 : Visualisation de l'indice PMV en temps réel.

3.3 Interface utilisateur

Une interface graphique utilisateur a été programmée en Java pour récupérer et stocker dans un fichier les trames de données. Puis, soit en temps réel, soit en différé, l'interface permet d'analyser les données reçues et d'afficher l'évolution en temps réel des grandeurs physiques mesurées par le capteur. Cette même interface permet aussi de rentrer des paramètres complémentaires (taux métabolique et l'indice d'isolement vestimentaire), et de calculer, à partir de l'ensemble de ces données, les indices de confort thermique selon le modèle mathématique présenté précédemment. L'affichage de ces indices (sous forme de mesure instantanée ou de graphique) évolue lui aussi en temps réel au fur et à mesure de la réception de nouvelles mesures. Les figures 3 et 4 présentent l'interface développée.

Figure 4 : *Panneau de configuration des paramètres humains*

4. Etude expérimentale

4.1 Choix du lieu d'étude

La validation du capteur passe par l'évaluation de ses capacités à retourner des informations sur le niveau de confort thermique via les indices PMV et PPD définis précédemment. Une étude simultanée sur le confort en terme de mesure via le capteur et en terme de ressenti utilisateur a donc été menée dans les locaux de l'EPF Ecole d'ingénieur basée à Troyes. Dans cet établissement recevant du public, certains endroits dédiés à la convivialité, comme le foyer des étudiants, doivent présenter de bonnes caractéristiques. Or, il a été constaté que le foyer des étudiants présentait un faible taux d'occupation à certaines périodes de l'année, pour cause d'inconfort (trop chaud ou trop froid). Par conséquent, il a été jugé bon de comparer les résultats issus du capteur multifonctions avec une enquête auprès des usagers du foyer afin de pouvoir caractériser ce lieu et améliorer ses performances le cas échéant.

4.2 Méthodologie :

La méthodologie suivie se décompose en deux étapes. La première étape consiste à effectuer un sondage auprès des usagers du lieu. Le questionnaire accessible en ligne, invite à donner un avis en fonction des saisons compte tenu de l'évolution du ressenti au fur et à mesure de la journée et de l'année. La seconde étape concerne les mesures et la caractérisation du confort en termes de valeurs. Ces dernières seront comparées aux résultats du sondage.

Lors de la mesure, le capteur est positionné sous la forme d'une station unique, à une hauteur d'environ 165 cm. Les mesures sont faites par de cycles d'une durée minimale de 2h avec un pas de temps de 2 minutes.

5. Analyse des résultats

5.1 Etude quantitative – Mesures expérimentales

Dans cette section, seuls les résultats relatifs aux indices PMV et PPD sont présentés. Les cycles de mesure suivants ont été réalisés :

- 12/11/2014 : 10h47 à 11h29 (cycle 1) et 14h46 à 18h36 (cycle 2) ;
- 13/11/2014 : 8h21 à 8h55 le lendemain (cycle 3) ;
- 14/11/2014 : 10h01 à 11h49 (cycle 4) et 14h31 à 17h31 (cycle 5).

Précisons que pour le calcul des indices de confort PMV et PPD, les paramètres humains ont été fixés comme indiqué dans le tableau 3, en lien avec la période (hiver) et l'usage du lieu dont on cherche à évaluer le confort.

Paramètres humain	Description	Valeur
Activité	Repos, debout	$M = 1.20 \text{ met}$
Vêtue	Tenue d'intérieur pour l'hiver	$I_{cl} = 1 \text{ clo}$
Travail extérieur	Inexistant	$W = 0 \text{ met}$

Tableau 3 : *Paramètres humains pour les cycles de mesure*

La figure 5 présente l'évolution des grandeurs PMV et PPD au cours d'un cycle, ici cycle 2

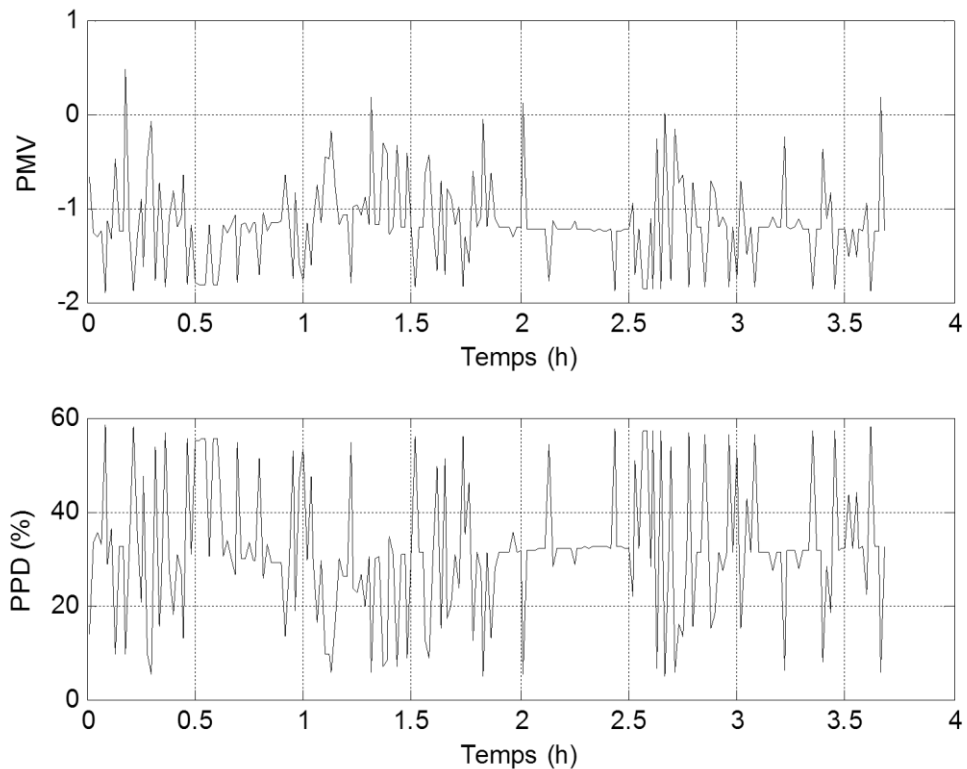


Figure 3 : *PMV et PPD cycle 2*

De manière générale, on constate que les valeurs du PMV restent pour la plupart entre 0 et -2 tandis que les valeurs de PPD demeurent entre 10 et 60 %.

Les valeurs moyennes des indices au cours des mesures sont représentées sur la figure 6 :

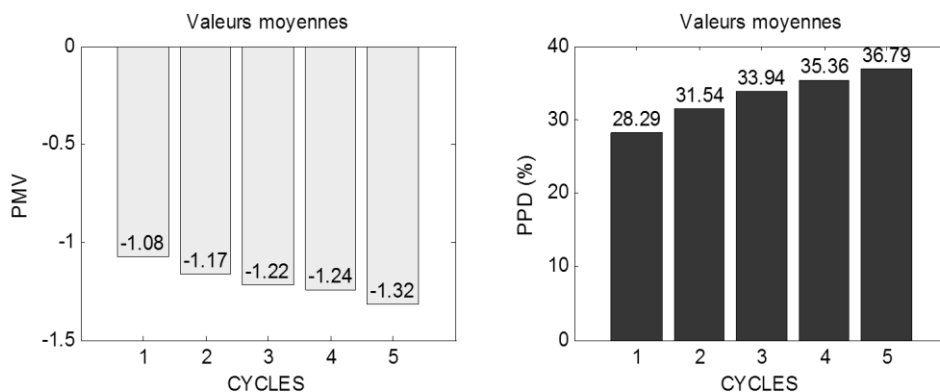


Figure 4 : *Valeurs moyennes des indices PMV et PPD pour les différents cycles*

Cycles	1	2	3	4	5
PMV	-1,08	-1,17	-1,22	-1,24	-1,32
PPD (%)	28,29	31,54	33,94	35,36	36,79

Tableau 4 : *Valeurs moyennes des indices au cours des différents cycles*

Les moyennes globales sont de -1,20 pour le PMV et 33,18% pour le PPD. Ceci laisse penser que la sensation de froid prédomine au sein du foyer pris comme environnement pour nos mesures.

5.2 Etude qualitative – Enquête

A l'issue du sondage, il ressort que 54 individus ont répondu au questionnaire. Les résultats du sondage au sujet du confort dans le foyer sont donnés dans la figure 7.

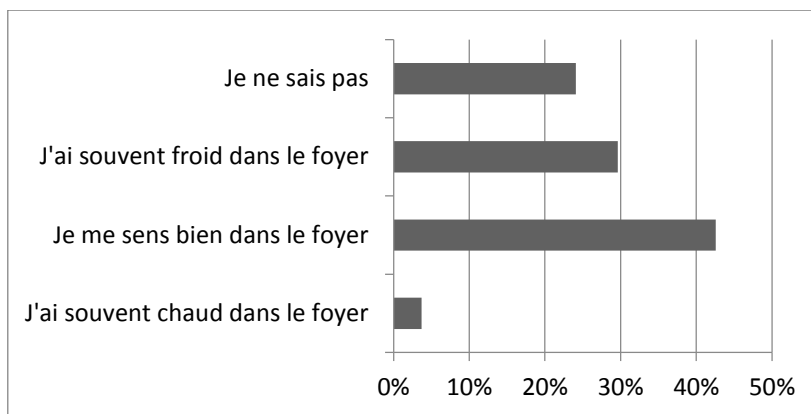


Figure 7 : Répartition des ressentis des occupants

Les choix de réponses proposés aux candidats n'ayant pas la même configuration que celle présentée dans le tableau 1. Plusieurs considérations sont possibles pour le calcul d'une valeur comparable au PPD mesuré. Néanmoins, concernant le pourcentage d'individus insatisfaits, nous avons obtenu un taux de 33,33% d'individus insatisfaits. Par ailleurs, si l'on attribue un indicateur de -3 et +3 pour les occupants ayant une sensation de froid et de chaleur respectivement, on obtient un PMV de -1.02 en moyennant les indicateurs de la population sondée.

Le faible écart entre l'étude quantitative et qualitative nous permet de conclure sur la fiabilité du capteur développé ainsi que le modèle mathématique utilisé.

6. Conclusion

La maîtrise de la consommation énergétique des bâtiments ne doit pas avoir pour conséquence la diminution du niveau de confort de ces derniers. La détermination du ressenti de l'utilisateur devient un outil plus qu'un critère permettant d'atteindre les objectifs des différentes réglementations en cours. Dans cette étude, une analyse comparée entre un capteur multifonctions, permettant la caractérisation dynamique du confort thermique au moyen de mesures localisées, et une enquête a été réalisée. La confrontation des résultats obtenus par la mesure, aux réponses du sondage, présente un faible écart de 0,15% en termes de PPD et témoigne de la pertinence de l'approche employée pour évaluer le niveau de confort thermique. La méthodologie employée dans cette étude a réussi à faire ressortir l'aspect subjectif du confort à travers le sondage réalisé. Les perspectives de ce travail concernent l'automatisation du système de mesure et le couplage aux outils actuels de suivi des consommations énergétique, GTB, présents dans les bâtiments. Ceci permettra de fournir aux utilisateurs les informations en temps réel sur le niveau de confort et aux gestionnaires d'optimisation de la gestion des ressources énergétiques.

Références

- [1] Hervé Chenailé. L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments. *Université de Grenoble*, 2006.
- [2] Jorge Hernan Maya Castano. Contribution à l'aide au choix des méthodes d'intégration de la subjectivité de l'utilisateur en conception de produits. *Université de Technologie de Compiègne*, 2010.
- [3] Nicolas Morel et Edgard Gnansounou. Énergétique du bâtiment. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Septembre 2007.
- [4] Bassam Moujalled. Thèse, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. *Institut des sciences appliquées de Lyon*, 2007