

L'évaluation du confort thermique au sein des véhicules avec des indices classiques - approche expérimentale

Thermal comfort evaluation inside vehicles with classical indices - experimental approach

Pierre-Yves Ouhimi¹, Thomas Lechartier¹, Paul Danca², Cristina Fabian²

¹ Université de Caen Basse-Normandie, IUT Cherbourg-Manche, Département GTE
120 rue de l'Exode, 50 000 Saint Lô, France

² Université Technique des Constructions Bucarest
bd. Pache Protopopescu 66, Bucarest, Roumanie
E-mail: paul.danca09@gmail.com

Rezumat

Modalitățile actuale de evaluare ale confortului termic în autovehicule nu sunt optimizate în acord cu cele două direcții importante și interdependente, confortul termic și consumul de energie. Mai mult decât atât principiile de determinare sunt bazate pe metode de evaluare confortului termic în interiorul clădirilor. Obiectivul prezentului studiu este de a investiga confortul termic din interiorul automobilului. Cu ajutorul instrumentelor de măsură, am urmărit variația parametrilor interiori (temperatura și viteza aerului, temperatura medie de radiație, umiditatea relativă) și al celor exteriori (temperatura și umiditatea, radiația solară). Estimând rata metabolică și izolarea termică produsă de îmbrăcămintea pasagerilor și cunoscând valorile parametrilor interiori, am calculat indicele PMV, urmărind posibilitatea utilizării acestuia în autovehicul.

Cuvinte cheie: confort termic, PMV, autovehicul, TSV, habitacul

Abstract

The current methods for thermal comfort evaluation inside the vehicles are not optimized in agreement with the two important and interacting directions, thermal comfort and energy consumption. More than that, the determination principles are based on the evaluation methods of thermal comfort inside the buildings. The primary subject of this study is to investigate the thermal comfort inside the vehicles. By means of the measuring tools, we followed the interior parameters variation (air temperature and speed, mean radiation temperature, relative humidity) and the exterior ones (humidity and exterior temperature, solar radiation). Estimating the metabolic rate and the thermal isolation produced by the passengers clothing and knowing the interior parameters value, we have calculated the PMV parameter, analyzing the possibility of applying it inside vehicles.

Key words: thermal comfort, PMV, vehicle, TSV, cabin

1. Introduction

Le confort thermique est perçu et ressenti différemment par tout à chacun, il n'y a donc pas de définition universelle de ce terme [1]. Il dépend principalement des caractéristiques physiologiques, psychologiques, environnementales [2].

Pour lutter contre les zones présentant de l'inconfort, l'organisme humain peut «s'autoréguler» thermiquement grâce aux informations que le corps envoie à l'hypothalamus car la température interne du corps doit de rester quasi constante.

Le corps humain s'adapte à son environnement, notamment grâce au principe de sudation (mécanisme physiologique inconscient permettant d'abaisser la température corporelle), en grelottant (activation forcée des muscles pour se réchauffer), ou encore en adaptant sa respiration (lors d'un effort ou non). On dit alors que l'organisme humain est homéotherme [3]. Il possède aussi le sens de l'anticipation car, lorsqu'une personne sait que la température extérieure est faible par exemple, il va se munir de vêtements en conséquence [4]. Cette anticipation représente l'approche psychologique de l'homme envers son environnement car il a conscience des limites de ses mécanismes d'auto régulation.

Le sang, d'une température d'environ 37 °C, circule dans les vaisseaux sanguins et perd en température lorsqu'il réalise un long trajet (des organes internes où il est réchauffé, comme le cœur ou le foie, vers l'organe en question, les doigts par exemple). Si la température d'un local est inférieure à la température dite de confort thermique, les vaisseaux sanguins se rétractent et le corps limite ses échanges thermiques avec l'air ambiant; c'est le phénomène de vasoconstriction. A l'inverse, apparaît le phénomène de vasodilatation. Ces deux phénomènes témoignent d'un inconfort notable dans un milieu donné.

La vitesse de l'air est aussi un paramètre important dans pour la notion de confort thermique car, plus sa valeur est élevée, plus la sensation de froid se fera ressentir.

Encore aujourd'hui, il n'existe aucune équation réussissant à prendre en compte tout les paramètres en lien avec le confort thermique [5] (en sachant que ceux exposés ci-dessus n'en représente que la partie principale). Pourtant, certains scientifiques du XXème siècle ont essayé de comprendre et de se rapprocher d'une équation illustrant le confort thermique dans un espace clos. Fanger fut celui qui laissa la plus grande trace (aujourd'hui encore) de ces travaux. Son travail de recherche était basé sur un modèle empirique [6]. Il réalisa un grand nombre de tests sur des sujets humains sous des conditions toutes plus différentes les unes que les autres (variation de la température, de la vitesse de l'air en circulation, etc) pour finalement aboutir à une situation où le confort thermique est atteint. Il inventa un indice appelé PMV (Predicted Mean Vote) allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud) avec 0 symbolisant la neutralité pour définir le confort thermique d'une pièce. La définition du PMV est valable seulement pour des personnes exposées de façon prolongée à des conditions constantes et avec un taux d'activité (métabolisme) constant.

Malgré tout, la notion de PMV n'est applicable que pour des températures ambiantes variant de 10 °C à 30 °C et pour des température rayonnantes allant de 10°C

L'évaluation du confort thermique au sein des véhicules avec des indices classiques- rapproche expérimentale

à 40 °C d'après les normes en vigueur dans le milieu du bâtiment aujourd'hui. Il n'y a pas de norme adaptée au milieu automobile délimitant le calcul du PMV [2, 7-11].

En outre, il réalisa d'autres études pour connaître le taux de personnes insatisfaites d'une ambiance. Il proposa l'équation du PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) qui est liée à celle du PMV [12, 13].

Tous les éléments influençant le confort thermique précédemment énoncés sont à prendre en compte lorsqu'il est question d'aménager l'habitacle d'une voiture. La climatisation permet de contrôler les caractéristiques de l'air extérieur. La performance du système de ventilation dépend principalement de ces paramètres :

- composition des vitres (et propreté)
- incidence de l'angle solaire
- débit d'air
- radiations dues aux objets (composition) de l'habitacle

A la suite de plusieurs expériences, des chercheurs ont démontré que les conducteurs avaient une « meilleure conduite » lorsque le confort thermique est proche d'être optimum [14]. D'autres ont également démontré que 85 % des trajets se font sur une distance d'environ 18 kilomètres répartis sur une plage horaire de 15 à 30 minutes [15]. Il faut donc adapter le confort thermique à ce paramètre. En outre, on peut réaliser une approche écologique du confort thermique. En effet, l'utilisation de la climatisation entraîne un surplus de la consommation d'essence pouvant atteindre 25 % en ville et 10 % en extra-urbain [16]. Donc, en utilisant des matériaux adéquats, le confort thermique et le respect de l'environnement peuvent être améliorés simultanément.

Une expérience fut réalisée sur une Skoda Octavia [17] pour comprendre quelles étaient les caractéristiques de l'air conditionné sortant des bouches d'aération. Les étudiants de doctorat ont réalisé un cadre composé de divers matériaux permettant à une caméra thermique de photographier en temps réel les divers profils de température de l'air des bouches d'aération. Ce cadre est composé d'une multitude de carrés en polyéthylène également répartis pour que la caméra puisse capter les températures en chacun des points du cadre. Les mesures de température ont été prises à l'avant (côté passager et côté conducteur) et à l'arrière du véhicule en adéquation avec les trappes de sorties d'air, en sortant des champs de température pour évaluer le confort thermique.

Une autre expérience fut menée [18] dans le but de comprendre les critères du confort thermique au sein d'un habitacle. Les auteurs ont utilisé, contrairement à l'expérience précédente, un système empirique en modifiant progressivement la température et l'humidité relative avec et sans la présence d'un sujet humain placé à l'avant de la voiture (côté conducteur). En effet, la température de la peau est sujet à de nombreuses contraintes. Elle augmente de manière significative dès lors qu'elle est exposée aux rayonnements solaires. Elle est aussi extrêmement dépendante de l'humidité relative. Si l'humidité relative n'est pas trop importante, la peau va pouvoir procéder à la sudation. Au contraire, avec une humidité relative importante elle ne va pas pouvoir le faire ce qui va donner une sensation d'inconfort. De plus, quand l'humidité relative est trop basse, la température du corps a tendance à augmenter.

Tout cela nous a conduits à proposer une campagne expérimentale dans une automobile pour évaluer différentes modalités de quantifier et évaluer qualitativement l'état de confort thermique. Cette étude représente une partie de notre stage de recherche licence et master et s'inscrit dans le projet INSIDE: *Innovative strategies of HVAC systems for high indoor environmental quality in vehicles* - PN-II-PT-PCCA-2013-4-0569.

2. Méthode expérimentale

La partie expérimentale a utilisé trois types de mesures: les capteurs de température i-button, l'évaluation Testo confort et les questionnaires des sujets humains.

Le système Testo est un système compact standardisé pour la détermination globale des index PMV et PPD. Il permet de mesurer la vitesse de l'air, l'humidité, la pression, l'intensité lumineuse, la température de l'air, la température rayonnante et le taux de CO₂. Dans nos expériences on utilisera surtout les deux températures – de l'air et rayonnante, l'humidité et la vitesse de l'air. Le thermomètre mesure la température ressentie dans un local, la sonde utilisé est de type k et sa plage de données va de 0°C à 120°C. L'anémomètre peut, quant à lui, mesurer de 0.06m*s-1 à 50m*s-1.

L'iButton est un capteur de température sans fil, à mémoire interne, sous la forme d'une pastille, que l'on peut placer sur n'importe quelle surface. Dans notre cas il est utilisé pour la prise de température sur les sujets humains. Il est placé par exemple, sur le front et sur la main gauche des sujets humains. Pour le transfert de données il faut le connecter à un ordinateur, muni du logiciel d'exploitation «OneWireViewer », par un port USB. Le logiciel extrait les données et les exprime sous forme d'un graphique de la température en fonction du temps.

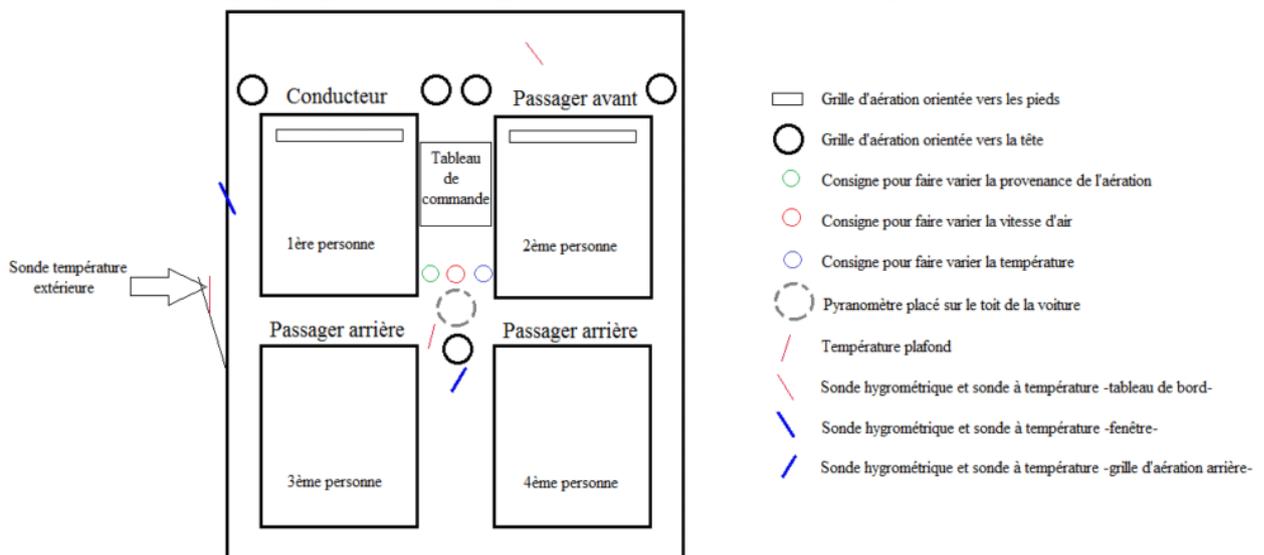


Fig. 1. Schéma de l'habitacle de la voiture et la position des capteurs

L'évaluation du confort thermique au sein des véhicules avec des indices classiques- rapproche expérimentale

Les occupants de la voiture avaient des dispositifs placés sur un de leur poignet et sur leur front. La voiture était également équipée de capteurs de mesure comme nous l'illustre le schéma de la Figure 1.

De plus, les sujets d'expérience devaient, toutes les cinq minutes, répondre à un questionnaire pour décrire ce qu'ils ressentaient à divers endroit du corps.

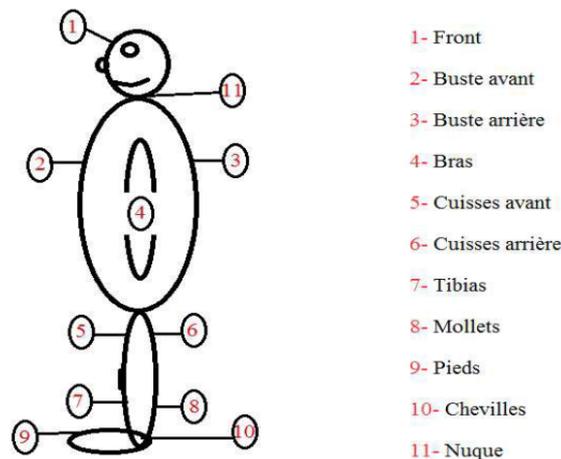


Fig. 2. Points de mesure sur le corps des sujets

Par la suite, nous avons eu à notre disposition des valeurs, données par le système Testo, divisées en 6 sessions. De plus, nous étions munis d'une sonde de température extérieure et d'un pyranomètre. A la suite de nos mesures, nous obtenons le flux solaire et la température suivante en fonction du temps (les séparations par traits verticaux exposent le changement de sessions au fil de l'expérience).

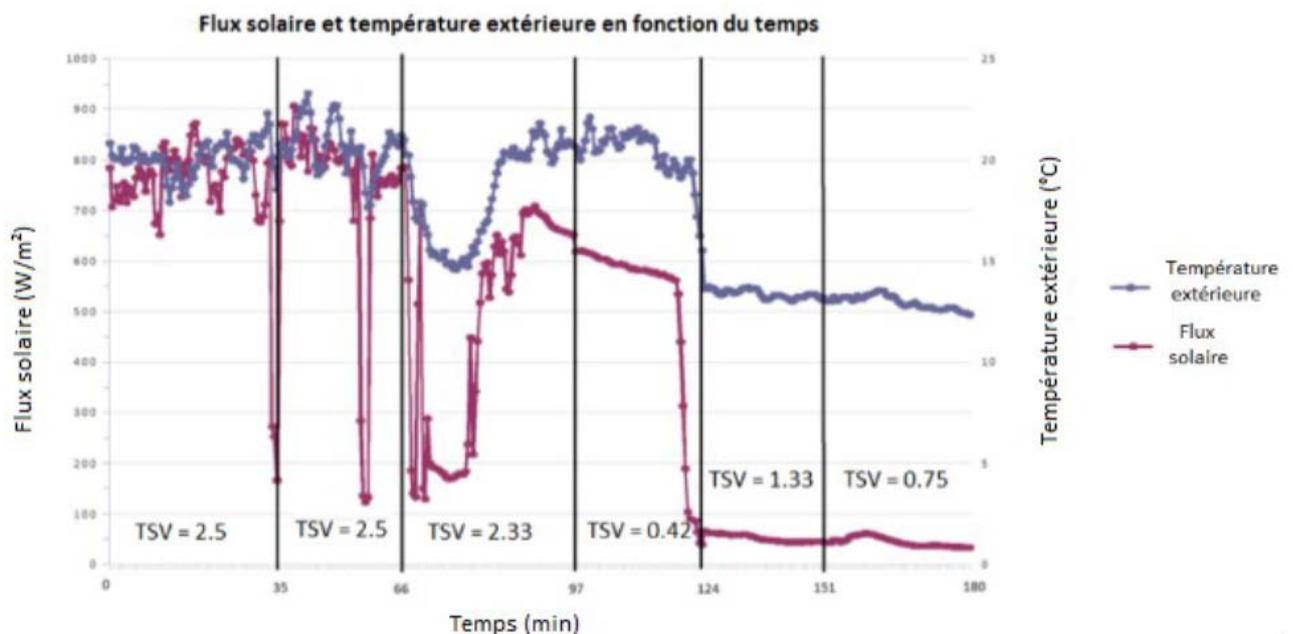


Fig. 3. Flux solaire et température en fonction du temps

L'utilisation des sujets humains nous a permis de recueillir la sensation thermique sous la forme de la note TSV (Thermal Sensation Vote) par l'intermédiaire des questionnaires complétés au long d'une période de 30 minutes, tous les 10 minutes. Pour les expériences avec les sujets humains, les quatre personnes sont placées dans la voiture. On fixe les iButtons sur leurs fronts et leurs mains gauches. Ensuite nous fermons les fenêtres, mettons en route la voiture et enclenchons la ventilation. Les mesures sont enregistrées tout pendant que les sujets remplissent un questionnaire leur demandant leurs sensations à plusieurs niveaux du corps (tête, dos, cuisse, chevilles ...), ainsi que leur sensation de confort. Tous ces éléments doivent être placés sur une échelle allant de -3 à +3, -3 étant une grande sensation de froid, +3 une grande sensation de chaud et 0 une ambiance neutre ou confortable.

3. Résultats

Les sessions 1 et 2 se rejoignent car les personnes ne se sentent pas très bien dans la voiture au regard de leurs réponses aux questionnaires. En revanche, les TSV retranscrits lors de la session 4 ne concordent pas avec ceux des sessions 1 et 2 car les personnes se sentent globalement bien. Cela peut s'expliquer en jetant un œil aux variations du flux solaire et de la température extérieure. En effet, ces paramètres sont élevés lors des sessions 1 et 2. Par contre, le flux solaire est moins élevé lors de la session 4 ce qui peut expliquer ces différences au niveau du ressenti des personnes dans la voiture. En outre, la température extérieure est globalement égale à celle présente lors des sessions 1 et 2.

Les sessions 3, 5 et 6 présentent toutes des caractéristiques différentes mais on remarque que les sessions 5 et 6 sont globalement similaires. Plus les passagers de la voiture restent longtemps dans l'habitacle et plus ils ressentent un inconfort dû à la chaleur alors qu'ils se sentaient bien au début de l'expérience. Par contre, lors de la session 3, au début les personnes étaient partagées entre le fait de sentir un léger ou un inconfort assez important, puis ils ont tous, au fil de l'expérience, ressenti un inconfort très important. Le flux solaire et la température extérieure descendent fortement au début de la session 3 mais remontent fortement à partir du milieu de la session 3. Le flux solaire et la température extérieure sont basses et constantes lors des sessions 5 et 6.

Par la suite, nous avons séparé toutes les valeurs en fonction des places que les passagers occupaient. Ensuite nous avons exprimé le TSV et le PMV en fonction de quatre paramètres : - la température intérieure; - le flux solaire; - la température de rayonnement; - la température du tableau de bord.

Nous avons divisé les résultats en deux parties différentes de celles exposées ci dessus. En effet, nous avons remarqué que les résultats des sessions 1, 2, 3 et 4 concordent. D'une part, dans la première catégorie de mesure, les valeurs du coefficient de détermination sont proches de 0 pour chacune des régressions linéaires de chaque graphique, que se soit pour les courbes de PMV et de TSV. Nous pouvons donc assez simplement en conclure que ces résultats ne sont pas probants. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces mauvais aboutissants.

L'évaluation du confort thermique au sein des véhicules avec des indices classiques- rapproche expérimentale

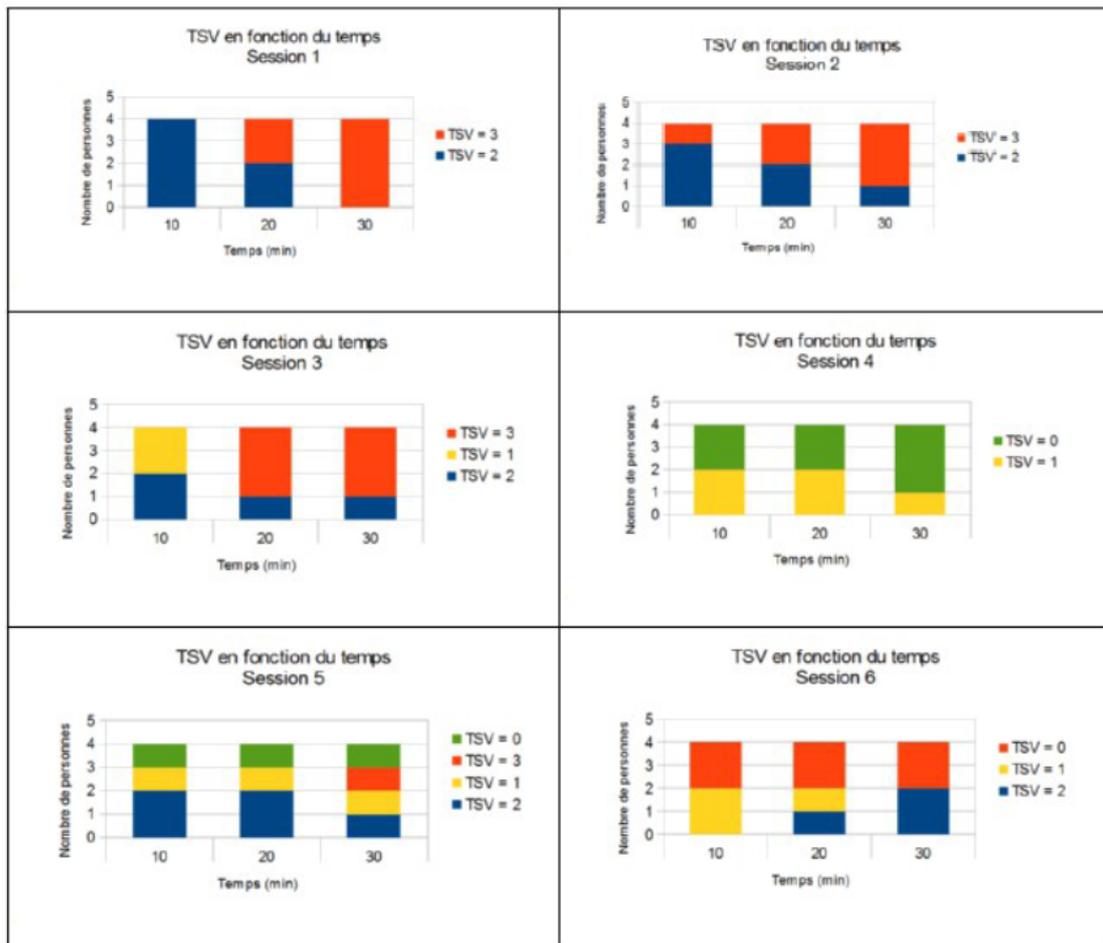


Fig. 4. Valeurs de TSV pour chaque session

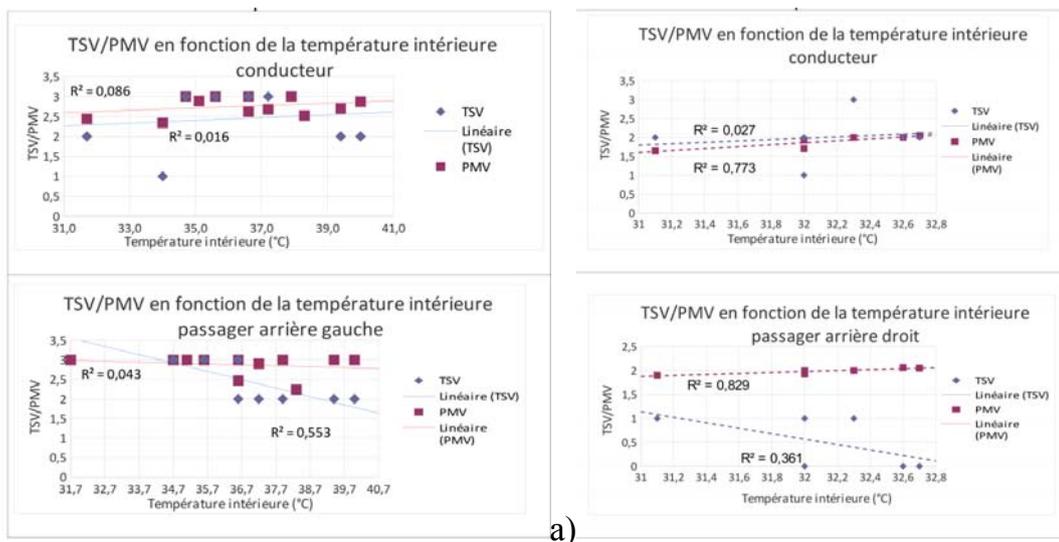


Fig. 5. Corrélation du TSV et PMV en fonction de température:
a) catégorie 1 session 1, 2, 3 et 4; b) catégorie 2 session 5 et 6

Les sujets humains testés lors de cette étude ont peut être donné des conclusions hâtives et peu représentatives des conditions de l'habitacle. Effectivement, le confort

étant une notion très subjective et différente pour tout à chacun, ils ont dû être affectés par les paramètres extérieurs à l'expérience.

D'autre part, dans la seconde catégorie de mesure, les valeurs du coefficient de détermination sont proches de 1 pour les régressions linéaires du PMV, alors qu'il est souvent proche de 0 pour celles du TSV. On peut donc en conclure que les sujets humains étaient, comme précédemment, affectés par les paramètres extérieurs à l'expérience. Par contre, les valeurs obtenues relatives au PMV sont assez concluante. Étant donné que la température extérieure et le flux solaire restent constants lors des sessions 5 et 6, les valeurs obtenues pour le PMV sont globalement constantes car les appareils de mesure (notamment le système Testo) prévus initialement pour le bâtiment donnent des valeurs optimums. En effet, ces appareils ont un long temps de réponse et lorsque les paramètres extérieurs au véhicule restent constants, cette configuration est idéale.

4. Conclusions

Les recherches dans le domaine de l'automobile étant axées sur l'efficacité énergétique (consommation d'essence etc.), les instruments de mesure du confort thermique, sont très peu nombreux et ne conviennent pas à aux dimensions de l'habitacle d'une voiture. Par exemple, l'appareil servant à mesurer la température radiante du système Testo est adapté au domaine du bâtiment. Il est utilisé pour collecter des données dans des espaces mois dynamiques en termes de variation des paramètres du climat intérieur que celui de la voiture. Nous pensons donc qu'il est nécessaire de modifier les normes concernant la prise de mesures dans l'habitacle des voitures et inventer des nouveaux instruments de mesure, car l'approche et le matériel utilisés actuellement pour ces mesures ne sont pas encore adaptés à ce type de configuration.

Remerciements: Cet article a été réalisé pendant les projets PN-II-PT-PCCA- 2011-3.2-1212 et PN-II-ID-PCE-2011-3-0835 avec le soutien financier de UEFICDI-Roumanie.

Références

1. Croitoru, C., *PhD Thesis: Studii teoretice și experimentale referitoare la influența turbulenței aerului din încăperile climatizate asupra confortului termic*. 2011, Technical University of Civil Engineering Bucharest.
2. Fanger, P.O., *Thermal comfort*. 1982, Malabar, FL.: Robert E. Krieger Publishing Company.
3. Stolwijk, J.A.J. and J.D. Hardy, in *Control of Body Temperature, Handbook of Physiology, Section 9, Chapter 4*, B. American Physiology Society, Maryland, Editor. 1977. p. 45 – 68.
4. de Dear, R. and G.S. Brager, *The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment*. International Journal of Biometeorology, 2001. **45**(2): p. 100-108.
5. Gao, N., H. Sun, and D. Ewing, *Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(14): p. 2557-2569.

L'évaluation du confort thermique au sein des véhicules avec des indices classiques- rapproche expérimentale

6. Fanger, P.O. *Proposed Nordic standard for ventilation and thermal comfort*. in *Proc. Int. Conf. On Building Energy Management*. 1980.
7. ISO 7730 - *Ergonomics of the thermal environment –Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. 2005.
8. ***, *Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort in ISO 7730*, I.O.f. Standardization, Editor. 1984.
9. ISO, *Ergonomics of the thermal environment -Evaluation of thermal environments in vehicles Part 3: Evaluation of thermal comfort using human subjects*, in *ISO 14505-3:2006*. 2006.
10. ISO, *Ergonomics of the thermal environment -Evaluation of thermal environments in vehicles Part 2: Determination of Equivalent Temperature*, in *ISO 14505-3:2006*. 2006, ISO.
11. ISO, *Ergonomics of the thermal environment - Evaluation of thermal environments in vehicles Part 1: Principles and methods for assessment of thermal stress*, in *ISO 14505-1:2007*. 2007.
12. Fanger, P.O., *The new comfort equation for indoor air quality*. *Ashrae Journal*, 1989. **31**(10): p. 33-38.
13. Fanger, P.O.a.P., C.J.K. . *Discomfort due to air velocities in spaces*. in *Proceedings of the Meeting of Commissions B1, B2, E1 and the IIR, 4, Belgrade*. 1977.
14. Alahmer, A., et al., *Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review*. *Applied Thermal Engineering*, 2011. **31**(6–7): p. 995-1002.
15. Rugh, J.P. and D. Bharathan. *Predicting Human Thermal Comfort in Automobiles in Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition*,. 2005. Toronto, Canada
16. Liu, J. and S. Zeng, *Progresses and needs in cabin environment research of transport vehicles*. *Building and Environment*, 2012. **47**(0): p. 3-4.
17. Hwang, S.D., C.H. Lee, and H.H. Cho, *Heat transfer and flow structures in axisymmetric impinging jet controlled by vortex pairing*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001. **22**(3): p. 293-300.
18. Alahmer, A., et al., *Analysis of vehicular cabins' thermal sensation and comfort state, under relative humidity and temperature control, using Berkeley and Fanger models*. *Building and Environment*, 2012. **48**(0): p. 146-163.