

Transfert de chaleur et d'humidité dans la chaussure d'un athlète pendant la course

Ahlem ARFAOUI¹, Mourad REBAY^{1,*}, Redha TAIAR² et Bernard BAUDOIN³

¹ Laboratoire UTAP-Thermomécanique, UFR sciences, BP 1039, 51687 Reims

² Laboratoire Analyse des Contraintes Mécaniques, UFR STAPS, BP 1036, 51687 Reims

³ Département Energétique Industrielle, Ecole des Mines de Douai, BP10838, 59508 Douai

* (auteur correspondant : mourad.rebay@univ-reims.fr)

Résumé - Nous avons mis en place une expérience permettant la quantification de l'interaction chaussure-pied pendant la course par le suivi en temps réel des températures locales, de l'humidité et des pressions plantaires. Les essais ont été réalisés dans une soufflerie dans 2 configurations de course : avec faible vitesse (simulant une marche rapide) et avec forte vitesse. Les températures sont mesurées grâce à des thermocouples miniatures. L'humidité est suivie à l'aide d'un thermo-hygromètre introduit dans la chaussure. Les résultats montrent un échauffement local dépendant de la vitesse de course, de la posture du coureur et les zones d'appui durant l'exercice. Pour le type de chaussure testé, l'humidité augmente en phase statique, mais diminue pendant la course.

1. Introduction

L'homme est un homéotherme, il doit maintenir la température de son corps à une valeur proche de 37°C. Il régule sa température grâce aux tissus actifs de son métabolisme. Lorsqu'il produit un effort prolongé, d'importantes pertes sudorales composées d'eau et de sel apparaissent. Ceci lui permet d'évacuer la chaleur produite pendant l'effort. L'évaporation de la sueur à la surface de la peau joue un rôle important dans l'évacuation de la chaleur. Le corps dégage environ 580 kcal par litre de sueur évaporée.

De nombreuses études se sont intéressées à l'évaluation du confort thermique du corps humain dans différentes ambiances et différentes postures : assis, debout, en marche, en course, dans l'habitacle d'un véhicule ... Le confort thermique dépend aussi bien des facteurs environnementaux (température, humidité et vitesse de l'air, température radiante ...), que de facteurs personnels (métabolisme et habillement) [1]. L'étude expérimentale du transfert de chaleur dans un corps a souvent été conduite à l'aide d'un mannequin chauffé [2]. Cette technique est utilisée, en particulier, dans l'analyse des micro-climats causés par les différents types de ventilation dans l'automobile.

Dans le but d'augmenter les performances sportives des athlètes, il est primordial de réaliser des études spécifiques afin d'appréhender les comportements physiologiques et thermomécaniques du corps. Au niveau de la chaussure, ces études concernent la résistance à l'usure, l'amortissement, et l'échauffement du pied en fonction de la vitesse du coureur, de la distance à courir, et de la surface du sol.

Les évolutions des pressions plantaires exercées par le pied sur la sole de la chaussure ont largement été étudiées dans la littérature [3]. Cependant, très peu d'études se sont consacrées à l'évaluation de la température ou de l'humidité dans des chaussures. Kilik et Kaynakli et al. [4, 5] ont décomposé le corps en 16 segments, et évalué la température de chaque membre en appliquant un bilan d'énergie. Ils ont traité les chaussures comme étant un habillement. Cette démarche est la plus souvent utilisée pour évaluer la température des pieds. Bergquist et de Holmer [6] ont déterminé expérimentalement la résistance thermique des chaussures de travail

dans des ambiances froides. Pour cela, ils ont utilisé comme modèle un pied métallique chauffé électriquement. Le flux dégagé par effet Joule est régulé, simulant ainsi, le flux évacué pendant la marche.

L'objectif de la présente étude est de développer une méthode de mesure afin d'évaluer le chauffage local, l'humidité et la pression plantaire d'un pied d'athlète, dans les conditions réelles de course. A notre connaissance, il n'y a pas eu de papiers dans la littérature traitant le transfert de chaleur dans les pieds de coureur en exercice.

2. Transfert de chaleur pied-environnement

La chaussure fournit une protection thermique pour le pied plus ou moins importante en fonction de sa conception. Les propriétés d'isolation d'une chaussure dépendent de sa forme, de sa structure, et des matériaux qui constituent ses différentes couches [4]. Une partie de la sueur produite par les pieds migre dans le tissu de la chaussure. La chaleur est évacuée du pied vers l'air ambiant par convection et évaporation à travers les ouvertures dans la chaussure, et aussi par diffusion dans le sol à travers les différentes semelles de la chaussure (seul point de contact corps-sol).

Le pied est un complexe articulaire formé par une ossature de forme variable et par plusieurs muscles, responsables de la qualité de l'appui et de la cinétique de son mouvement. Au cours du mouvement, le pied passe par 2 positions de stabilité : le VFE (Valgus Flexion Rotation Externe) et le VRI (Varus Flexion Rotation Interne) (Figures 1a et 1b). Son échauffement local dépend des zones d'appui dans les deux positions qu'il prend pendant le mouvement.

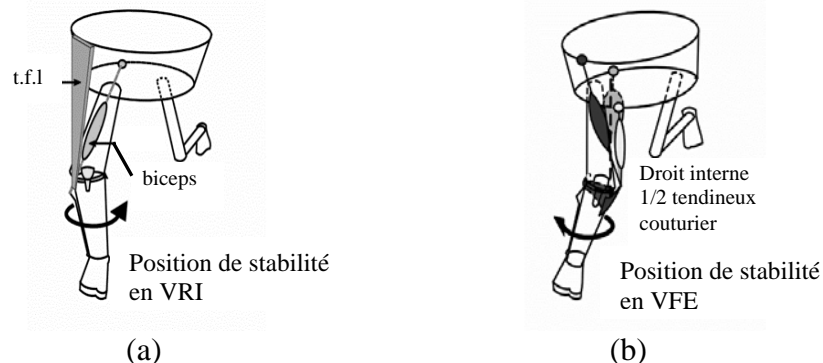


Figure 1 : Positions de stabilité au cours du mouvement : (a) VRI et (b) VFE

3. Protocole d'essais

Afin d'améliorer les chaussures de sport et le confort thermique (que ce soient sportifs de haut niveau ou coureurs occasionnels), des essais ont été réalisés dans une soufflerie à l'école des mines de Douai (degré d'hygrométrie égale à 65%). L'athlète effectue une course sur un tapis roulant, placé lui-même dans la soufflerie. La température ainsi que la vitesse de l'air sont régulées ($T_{\text{air}} = 20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ et $V_{\text{air}} = 0,5 \text{ m/s}$). La température du tapis ainsi que les surfaces rayonnantes non pas été mesurées mais supposées égales à la température ambiante. Nous avons réalisé des essais avec 2 vitesses de course sur un sujet de sexe masculin âgé de 28 ans et de type sportif. La vitesse de course correspond à celle du défilement du tapis roulant :

- Essai 1 : le sujet enfle la paire de chaussure (pointure 44) et se met sur un tapis roulant en position statique pendant 2 minutes. Il court ensuite à une vitesse de 4 km/h pendant 4

minutes (correspondant à une marche rapide). Enfin, il se replace de nouveau en position debout pendant 4 autres minutes. Ceci permet le suivi de l'évolution complète du champ de température avant, pendant et après la course, durant les trois phases : statique, effort et récupération.

- Essai 2 : le sujet effectue le même protocole que dans l'essai 1. Cependant, la vitesse du tapis a été imposée égale à 16 km/h (correspondant à une course rapide).

Pendant ces essais, nous avons enregistré les températures en 3 zones différentes du pied : la plante, la voûte plantaire et le talon. La chaussure est de taille 43 et sa longueur est de 26,9cm. Les mesures de température sont assurées par des thermocouples de type K (Chromel-Alumel), de diamètre 0,25 mm, introduits entre la semelle principale (en polyéthylène) et la semelle de propreté (en tissu), sur l'axe médian de la chaussure. Le premier thermocouple est placé à 5,5cm du bout avant de la chaussure, le deuxième à 16,2cm et le troisième à 24,7cm. (Figure 2a). Les thermocouples sont reliés à une centrale d'acquisition haute fréquence (INET 200) (Figure 2b). L'humidité est stockée toutes les secondes dans la puce électronique d'un thermo-hygro-bouton de 1.5 cm de diamètre, introduit entre la chaussure et le haut du pied. En plus des mesures thermiques et d'humidité, nous avons réalisé des mesures de pressions plantaires à l'aide de la plate-forme Zebris. Ces mesures permettent de comprendre la cinétique du mouvement et la variation des zones d'appui du pied pendant la course.

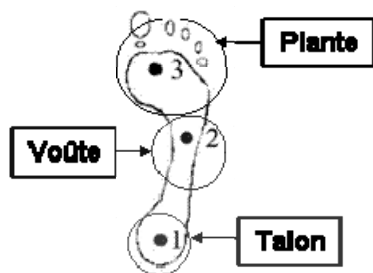


Figure 2a : *Emplacements des capteurs de température*

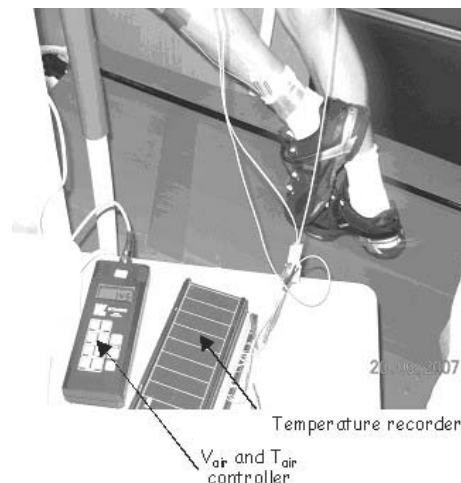


Figure 2b : *Dispositif expérimental*

4. Résultats et discussions

4.1. Température à l'arrêt avant le début de la course

Notons sur la figure 3 que les températures enregistrées dans les 3 zones du pied ne sont pas égales. En effet, la température est de 22,2°C au niveau du talon et de 23,3°C au niveau de la plante. Elle est plus élevée sur la voûte plantaire (24,65°C). Les zones de contact du pied avec la semelle sont donc plus froides que la voûte plantaire. Cela peut s'expliquer par les pertes de chaleur par conduction dans les zones de contact avec la semelle. En effet, le creux de la voûte n'est pas un point d'appui du pied, il n'est donc pas en contact direct avec la semelle.

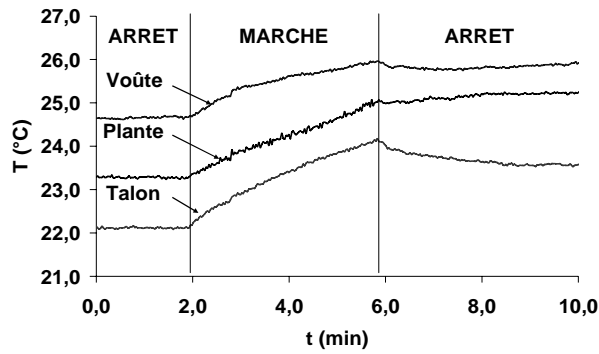


Figure 3 : Evolutions des températures en course avec faible vitesse

4.2. Température au cours du mouvement

Le graphe 4 représente l'élévation des températures des 3 points de mesure au cours de l'essai 1 (vitesse de 4 km/h). L'élévation la plus importante se trouve au niveau du talon. En effet, après 4 minutes, la température du talon augmente d'environ 2 °C, alors que celle de la plante s'élève de 1,6°C et celle de la voûte augmente 1,2°C.

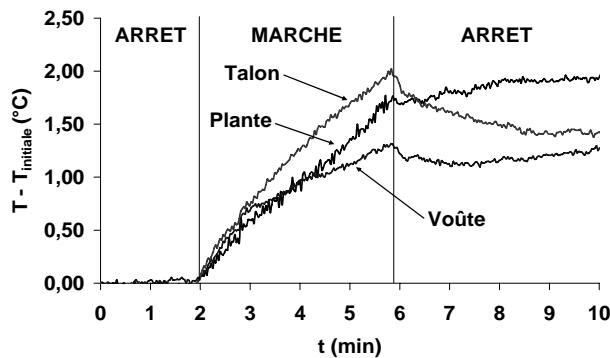


Figure 4 : Elévations de températures en course avec faible vitesse

Dans l'essai 2, correspondant à une course avec une vitesse de (16 km/h), la température de la plante augmente d'environ 6°C alors que celle du talon augmente de 4,5°C (Figure 5). Contrairement à la marche, l'échauffement est plus important au niveau de la plante que sur le talon. La voûte a toujours l'élévation de température la plus faible (environ 3°C ici).

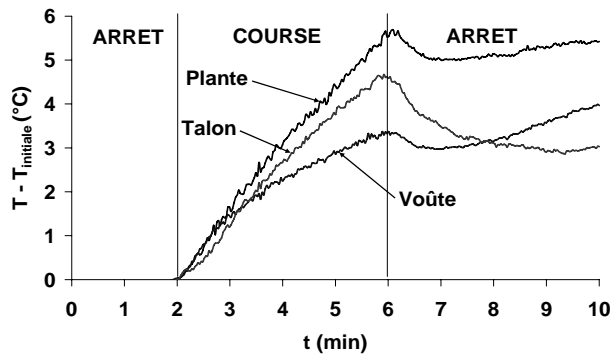


Figure 5 : Elévations de températures en course avec forte vitesse

Cette différence dans les zones d'échauffement maximum entre les deux essais est due au changement des zones d'appui du pied entre les 2 essais. L'appui du pied sur le sol se fait en

trois temps : la réception, l'appui intermédiaire et la poussée. Lors de la marche, le talon a une contribution plus importante que la plante dans la réception au sol et dans l'appui intermédiaire. La durée pendant laquelle le talon est en contact avec le sol est plus grande que celle du contact plante-sol. En revanche, à cause de la posture du corps du coureur pendant la course à grande vitesse (légèrement penché vers l'avant), c'est la plante du pied qui assure la réception et la poussée.

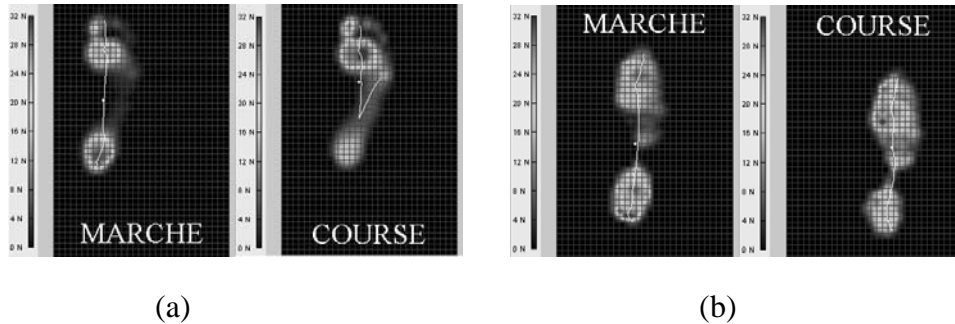


Figure 6 : Pressions plantaires en marche et en course à pieds nus (a) et avec chaussures (b)

Les mesures de la répartition des pressions plantaires durant le mouvement du pied au moyen de la plate-forme de force Zebris sont présentées sur la Figure 6. Que ce soit à pieds nus ou avec chaussures, on observe que les pressions les plus élevées en marche se situent au niveau du talon, tandis qu'elles se situent au niveau de la plante des pieds durant la course. Les zones de pression élevée entraînent plus de frottement entre le pied et la semelle de la chaussure, augmentant ainsi la production de la chaleur localement.

En comparant les élévations de température dans les deux essais, on peut remarquer qu'elles sont plus importantes en course qu'en marche. La cadence des foulées en course, supérieure à celle en marche, augmente la fréquence du frottement du pied avec la semelle, produisant ainsi plus de chaleur.

4.3. Températures enregistrées après le mouvement

Entre la 6^{ème} et la 10^{ème} minute de chaque essai, le coureur se tient debout de nouveau sur ces deux pieds pendant 4 minutes. Cette phase, correspondant à la récupération après l'effort, est aussi importante dans l'étude du confort thermique des athlètes. En effet, il est important de quantifier la capacité d'une chaussure à évacuer la chaleur emmagasinée pendant l'effort.

Les figures 5 et 6 montrent que, pour les deux essais, les températures de la plante et de la voûte plantaire diminuent légèrement pendant la phase de récupération, passent par un minimum (atteint à environ une minute après l'arrêt de l'effort), puis augmentent de nouveau. En revanche, la température du talon diminue tout au long des 4 minutes dans les deux essais. Elle baisse de 0,5°C dans l'essai 1, et de 1,5°C dans l'essai 2, sous l'effet du dégagement la chaleur par conduction du pied vers le sol à travers les différentes semelles de la chaussure. Des mesures de pressions plantaires avec la plate-forme Zebris montrent que le contact entre le pied et la semelle est le plus important au niveau du talon en position statique.

4.4. Variation de l'humidité

Les variations de l'humidité dans le temps durant les 2 essais sont présentées sur la figure 7. Pendant la 1^{ère} phase statique, l'humidité relative augmente dans les 2 essais de 65 à 73% à cause du confinement du pied dans la chaussure. Elle diminue dès que le coureur se met en exercice, puis re-augmente pendant la 2^{ème} phase statique. La diminution est plus marquée

lors d'une course à grande vitesse (essai 2). Cette diminution est due à l'évaporation de la sueur à travers les ouvertures existantes sur la partie supérieure de la chaussure, là où est placé le thermo-hygro-bouton. Les ouvertures permettent le renouvellement d'air frais en contact avec les surfaces des chaussures, et accélèrent ainsi l'évaporation de la sueur.

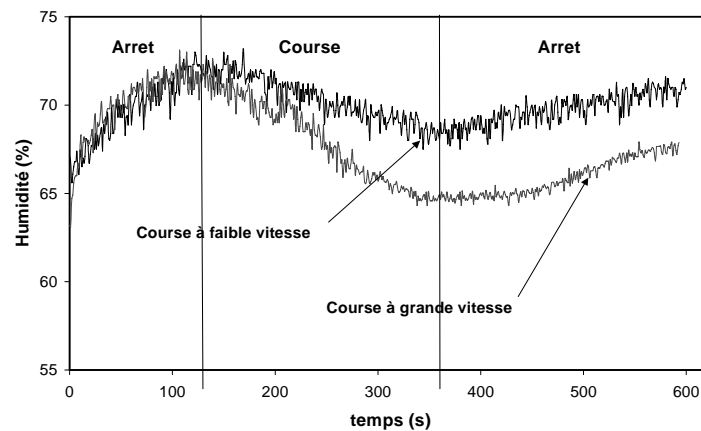


Figure 6 : Evolutions de l'humidité durant les 2 tests

5. Conclusion

Les températures enregistrées à différents endroits de la sole du pied montrent un échauffement local dépendant de la vitesse de course et de la zone d'appui durant l'exercice. A cause du changement de la cinétique du mouvement entre la course et la marche, la plus grande élévation de température est localisée en dessous du talon pendant la marche, et en dessous de la plante pendant la course. Ces modifications sont dues au déplacement des zones de frottement entre le pied et la semelle. Pendant la phase de récupération après l'effort, la chaleur est dégagée plus facilement à travers la semelle qui se trouve en dessous du talon. Ceci s'explique par la diffusion de la chaleur emmagasinée pendant la course par la zone ayant la plus grande part dans le support du poids du corps. L'enregistrement de l'humidité pendant l'exercice montre que celle-ci augmente dès que le coureur enfle les chaussures, elle baisse ensuite pendant la course et augmente de nouveau dès que le coureur s'arrête. La baisse est plus importante durant la course à forte vitesse à cause de l'évaporation à travers les ouvertures dans la partie supérieure de la chaussure.

Références

- [1] R. Kenshalo, *Correlations of temperature sensation and neural activity: a second approximation, Thermo-reception and temperature regulation*, Springer-Verlag (1990)
- [2] J. Fan and J. Keighley, An investigation on the effects of: body motion, clothing design and environmental conditions on the clothing thermal insulation by using a fabric manikin, *Int. J. of Clothing Science and Technology*, 3 (1991), 6–13
- [3] M. Koch, Measuring plantar pressure in conventional shoes with the TEKSCAN sensory system, *Biomed Tech*, 38 (1993), 242–250
- [4] M. Kilic, O. Kaynakli, R. Yamankaradeniz, Determination of required core temperature for thermal comfort with steady-state energy balance method. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 33 (2006) 199-210
- [5] O. Kaynakli, R. Ramankaradeniz, and M. Kilic, Evaluation thermal environments for sitting and standing posture, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 30 (2003), 1179-1188
- [6] K. Bergquist, I. Holmér, A method for dynamic measurement of the resistance to dry heat exchange by footwear, *Applied Ergonomics*, 28 (1997), 383-388