

Analyse de la distribution thermique du visage

Fabrice DE OLIVEIRA ^{1*}, Pierre PALIER ¹, Claudine GEHIN ², André DITTMAR ²

¹Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB NANTES)

11, Rue Henri Picherit – BP 82341 – 44323 Nantes Cedex 3.

²Institut des Nanotechnologies de Lyon, CNRS, bât Léonard de Vinci, Equipe Microcapteurs et Microsystèmes Biomédicaux 20, avenue Albert Einstein – 69621 Villeurbanne Cedex.

* (auteur correspondant, doctorant: fabrice.de-oliveira@cstb.fr)

Résumé – La distribution thermique de la peau du visage est un des indicateurs pertinents de la thermorégulation corporelle en fonction des contraintes thermiques environnantes. Les travaux présentés ici portent sur les analyses statique et dynamique issues de traitement d'images thermographiques chez l'homme. Deux approches de mesure de la Variabilité de la Température Cutanée (VTC) sont comparées pour optimiser l'analyse dynamique.

1. Introduction

Les méthodes de mesure médicale ont évolué progressivement depuis l'invasif, le mini-invasif, le non invasif pour aboutir aux exo capteurs, c'est-à-dire mesure à distance et/ou sans contact, assurant confort, ergonomie, discrétion des mesures. La connaissance des mécanismes thermo-neuro-vasculaires de la peau est essentielle pour la compréhension de l'interaction homme-environnement. Riche en informations et réactions, la peau constitue un effecteur ultraperformant dans les mécanismes de thermorégulation. La température faciale a un grand intérêt pour l'évaluation de la thermorégulation cérébrale. Elle est un indice de l'activité système nerveux autonome [1]. La thermographie faciale peut être interprétée par des identifications de forme [2], par des mesures d'asymétries de température [3], par la présence ou l'absence de la réponse du système nerveux sympathique liée à l'activité de vasoconstriction cutanée (indicateur de la réponse à un stress physique ou psychologique) ou encore par l'environnement ambiant. Nous présentons différentes méthodes d'évaluation de la température cutanée en introduisant de plus la notion de l'analyse de la VTC. Nous présentons la complexité du vivant et les nombreuses sources qui sont susceptibles d'influencer la VTC. Ensuite une méthode de segmentation d'image par région d'intérêt est présentée. Cette méthode sert de support d'analyses statique et dynamique.

2. L'imagerie thermique

La peau est considérée comme un corps gris dont l'émissivité e est proche de celle d'un corps noir. Elle dissipe sa chaleur en partie par radiation. Pour ces corps, la loi de Stefan-Boltzmann intègre la notion d'émissivité. L'émissivité mesure l'efficacité de radiation d'un corps naturel par rapport à un corps noir. Elle peut varier en fonction de la longueur d'onde et est comprise entre 0 et 1. La loi de déplacement de Wien est obtenue par la dérivation de la loi de Planck. Elle donne la longueur d'onde correspondant au maximum de rayonnement spectral d'un corps noir en fonction de sa température. À partir de cette loi, nous identifions le fait que la peau à 35°C émet un maximum d'énergie à une longueur d'onde de 9.4 μm . Il est donc primordial d'étudier le spectre dans une gamme de longueur d'ondes voisine de 9 μm [4]. Dans nos travaux, notre domaine de mesure thermographique se situe entre 7 et 13 μm . Cette mesure est réalisée par une caméra infrarouge de résolution thermique inférieure 0.1 °C à 30°C et de résolution spatiale 160 × 120 pixels. L'intérêt de la thermographie infrarouge pour l'analyse thermique de la peau réside en quatre points: (a) Tout corps, à une température quelconque, émet de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge; (b) Dans tout organisme vivant, la température cutanée est étroitement liée à la régulation de l'irrigation sanguine dans les tissus; (c) La modulation de cette irrigation est une manifestation de la

thermorégulation qui est pilotée par l'activité du système nerveux sympathique ([5], [6]); (d) La thermographie est une méthode de mesure sans contact du type exo capteur.

3. La température cutanée, mesure complexe et multifactorielle

3.1. La peau et les hétérogénéités du visage

La peau est un échangeur thermique complexe qui peut être présenté schématiquement comme un matériau multicouche. La structure cutanée est généralement stratifiée suivant trois couches. Toutes les zones du visage ne répondent pas de la même façon aux stimulations thermiques. La diversité des zones cutanées est importante. Par exemple, le débit sanguin cutané du front varie très peu selon les sollicitations thermiques chaudes ou froides. Au contraire de cette zone, les autres parties du visage, oreilles, joues et nez en particulier, se comportent de la manière habituelle : vasodilatation à la chaleur ; vasoconstriction au froid [5]. Un autre type de vascularisation est présent sur le visage. Les artères et les veines ophtalmiques situées dans la région périorbitaire permettent d'accéder aux indicateurs morphologiques suffisamment stables thermiquement pour être utilisés comme une référence de la distribution spatiale et thermique du visage. Ces artères viennent en effet des tissus profonds et se présentent en surface dans la région périoculaire avec une température du sang proche de la température interne du corps. Nous identifions ce type de vascularisation comme le système vasculaire non cutané.

3.2. Les facteurs affectant la température cutanée

L'ambiance thermique peut affecter la distribution thermique locale [3]. Les facteurs environnementaux incluent la température de l'air, la vitesse d'air locale, l'humidité relative, les asymétries de rayonnement, l'émissivité de la peau (0.989 ± 0.01 , [7]), les facteurs de formes par rapport aux surfaces voisines rayonnantes. Chacun de ces facteurs induit un biofeedback de l'organisme par une modification du comportement de la thermorégulation locale dans le but d'atteindre l'homéostasie thermique (capacité à maintenir l'équilibre thermique du corps humain en dépit des contraintes extérieures). Il devient donc nécessaire d'évaluer et de contrôler très précisément les conditions expérimentales (ambiance climatique, stimuli cognitifs, activité physique, acclimatation...) lorsque l'on souhaite quantifier le comportement thermique de la peau. Une attention toute particulière est à apporter dans l'analyse thermique de la peau. Il s'agit de l'état émotionnel, psychologique des sujets, de leur historique à court et à long terme. La figure 1 présente l'ensemble des facteurs affectant la température de surface de la peau.

4. La thermographie du visage

4.1. Analyse anatomique spatiale et statique

L'analyse spatiale est réalisée à partir d'un algorithme de traitement d'images (analyse 2D) qui est composé des étapes suivantes : (a) Détection du visage par segmentation de l'image et sélection morphologique des régions [9]; (b) Détection des points d'intérêt périoculaires; (c) Segmentation locale par région; (d) Mesure locale de température (moyenne par région). Cette méthode de traitement a été testée en ambiances contrôlées pour extraire des mesures thermiques sur le visage. La variation de la température moyenne par région est observée au cours de l'alternance (toutes les 10 minutes) de deux ambiances climatiques distinctes (A, B, cf. figure 2). Ces sollicitations climatiques ont pour but de modifier de l'aspect convectif (0.5 et 2 m.s^{-1}) à température d'air et humidité relative constantes. Les disparités thermiques inter régions et intra régions sont très différentes. Nous pouvons aussi noter que les régions

périorbitaires sont stables thermiquement. Un exemple de mesure de la figure 2 par traitement d'image thermographique est présenté dans les figures 3 a et 3 b.

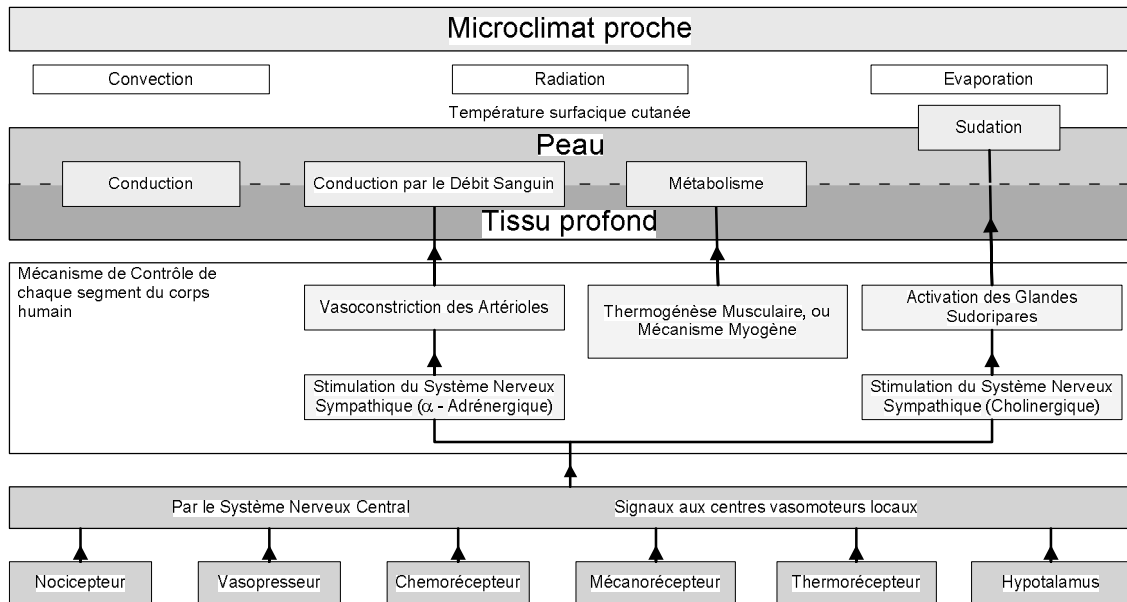


Figure 1 : Facteur affectant la température de surface de la peau [8]

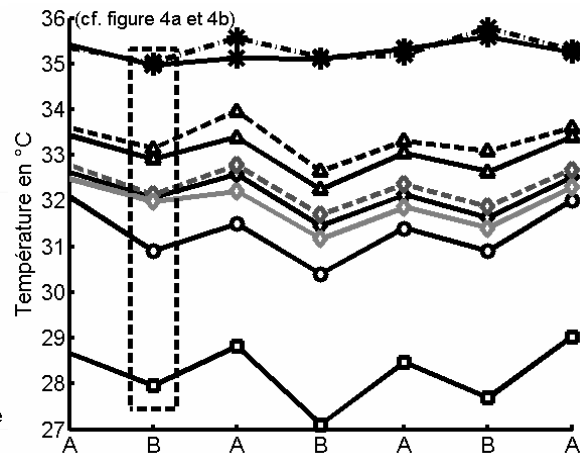
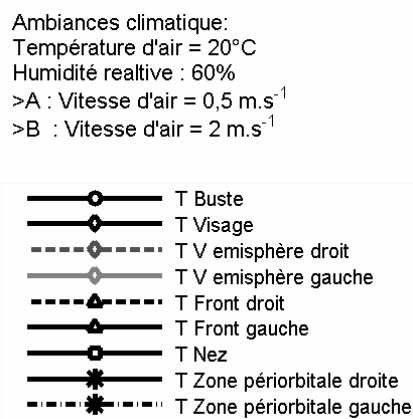


Figure 2 : Exemple de mesure en présence d'une alternance d'ambiances climatiques contrôlées (A, B)



Figure 3 a : Image originale issue de la caméra infrarouge.

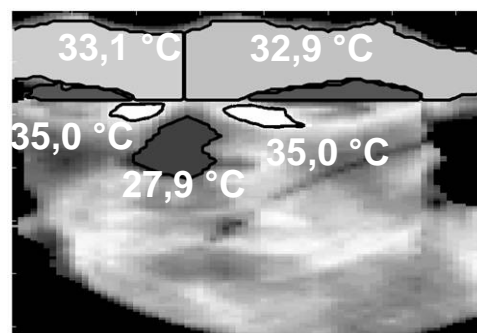


Figure 3 b : Exemple de segmentation d'image infrarouge et de mesures par régions d'intérêt, héli-fronts, nez, régions péri-orbitales.

4.2. Analyse dynamique de la VTC, comparaison de la méthode de segmentation par région avec une méthode d'extraction du gradient spatial par la méthode de Frei-Chen.

La microcirculation sanguine cutanée [10] est sous le contrôle du système nerveux sympathique (0.001-0.1 Hz). Cet état de fait nous permet d'envisager l'évaluation indirecte des

fonctions périphériques du système nerveux autonome par la mesure de la température cutanée (cf. figure 1). La microcirculation cutanée joue un rôle important dans différents mécanismes physiologiques et est elle-même influencée par des mécanismes qui sont plus ou moins liés à la circulation sanguine générale, comme la respiration (façon indirecte par le biais des barorécepteurs, 0.15-0.6 Hz) ou encore le rythme cardiaque (0.6-2 Hz) [11]. Le premier mécanisme, le plus important, est la thermorégulation [6] qui implique plus précisément les bandes de fréquence liées au métabolisme (0.008-0.02 Hz) et au mécanisme myogène (0.05-0.15 Hz). D'autres mécanismes non thermorégulateurs, tels que le stress psychologique [12], la vigilance et les émotions [5] ont une influence sur la microcirculation. L'analyse de la VTC [13] consiste donc à étudier ces mécanismes physiologiques entre 0 et 2 Hz. La figure 4 présente une mesure spatio-temporelle de la VTC, basée sur l'algorithme de segmentation (cf. 4.1) au cours du temps (analyse dans l'espace 2D+t).

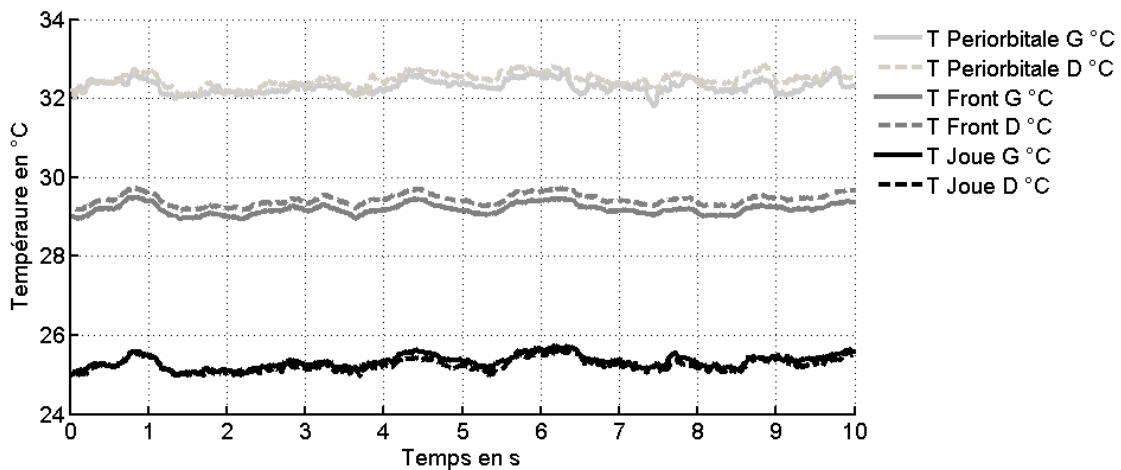


Figure 4 : Exemple de mesure d'extraction de signaux vidéo thermographique par régions d'intérêt sur un sujet en ambiance froide.

L'analyse de la VTC est réalisée à partir de la densité spectrale des différents signaux. Les résultats suivants présentent une analyse spectrale de la VTC sur un même sujet dans deux ambiances, une ambiance confortable (salle climatisé à 20 °C, sans écoulement d'air) et une ambiance froide et sèche ($T_{air} = 15^{\circ}C$, $HR = 10\%$, $V_{air} = 1 m.s^{-1}$). Ces mesures ont aussi été réalisées dans un caisson permettant l'homogénéisation des apports radiatifs et l'isolement du sujet aux ventilations parasites autres que la ventilation naturelle du corps.

Pour valider notre méthode de mesure, nous introduisons une analyse temporelle du gradient de Frei-Chen [13] : (a) Détection du visage par segmentation de l'image et sélection morphologique des régions [9]; (b) Rehaussement d'image par filtrage médian 9x9; (c) Détection de contour 2D par application du gradient de Frei-Chen ; (d) Segmentation des plus forts gradients (masque binaire); (e) Mesure de la température (1).

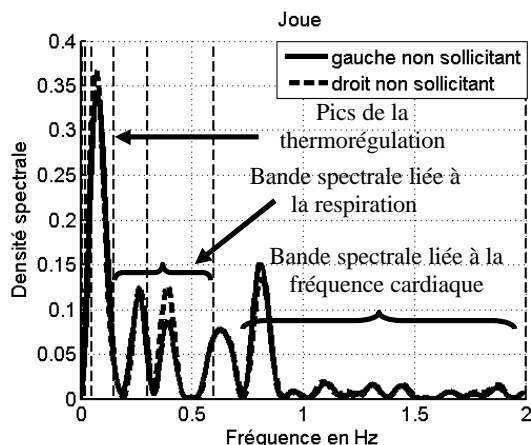


Figure 5 : VTC spectrale sur les joues en ambiance confortable (non sollicitante).

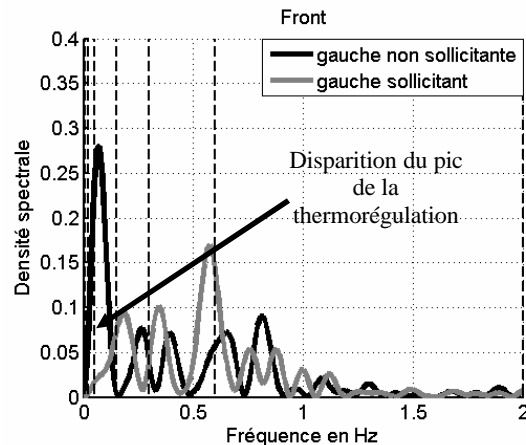


Figure 6 : VTC spectrale sur la zone du front gauche en ambiances contrôlées.

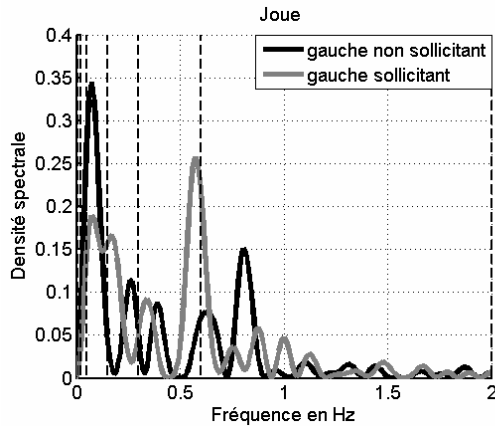


Figure 7 : VTC spectrale sur la zone de la joue gauche en ambiances contrôlées

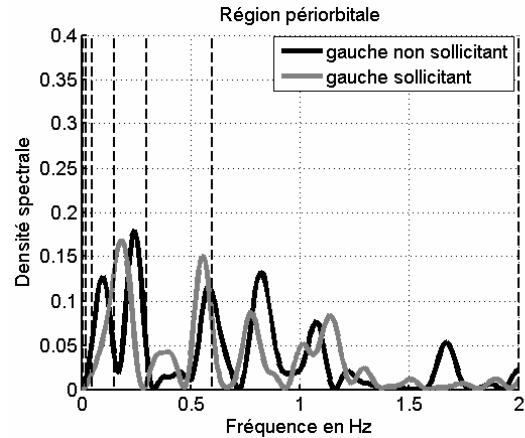


Figure 8 : VTC spectrale sur la zone périorbitale gauche en ambiances contrôlées

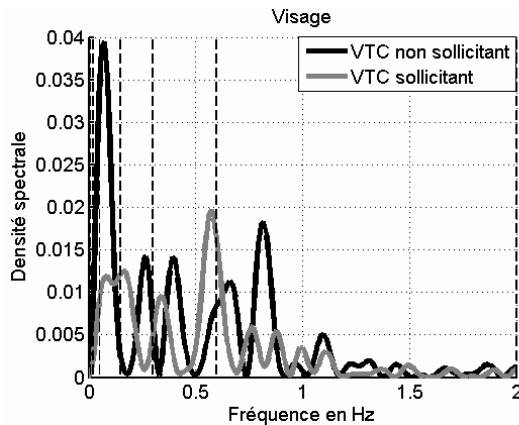


Figure 9 : VTC spectrale mesurée par la méthode du gradient de Frei-Chen au cours du temps sur l'ensemble du visage.

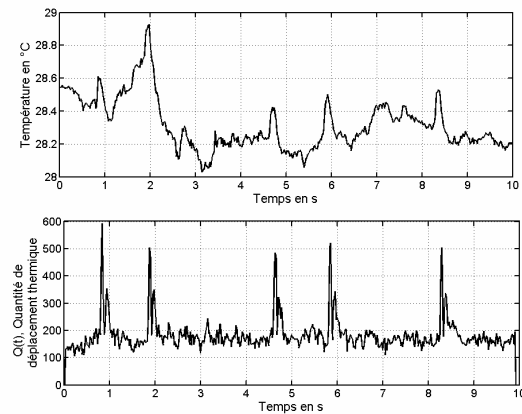


Figure 10 : VTC et Influence des déplacements périoculaires des paupières par mesure du gradient temporel du gradient de Frei-Chen.

$$VTC_{Frei-Chen}(t) = \text{moyenne} \left[\left\{ \text{Frei-Chen}(I(t)) \times I(t), \neq 0 \right\} \right] \quad (1)$$

La figure 5 illustre le fait que notre mesure par segmentation 2D+t nous restitue le même profil spectral sur deux régions symétriques. Ce profil est identique à l'analyse spectrale de la VTC par la méthode Frei-Chen (cf. figure 10). Nous remarquons aussi que malgré l'écart qui existe entre les températures du front et des joues (environ 4°C, cf. figure 4), nous obtenons les mêmes profils spectraux (cf. figures 6 et 7) et donc une régulation thermique quasiment identique sur ces deux régions. A l'instar de ces régions, la zone périorbitale est plus complexe à analyser (cf. figure 8). Il faut tout d'abord garder à l'esprit que cette région possède une vascularisation non cutanée prédominante. Ensuite, cette mesure est aussi influencée par les battements de paupières qui créent localement une cavité thermique (figure 10). La mesure de la quantité de déplacement est définie par le gradient temporel (2).

$$Q(t) = \sum \left| \text{Frei-Chen}(I(t)) - \text{Frei-Chen}(I(t-1)) \right| \quad (2)$$

La figure 8 présente donc des spectres particuliers. La localisation des pics spectraux est en accord avec les VTC spectrales du front et des joues, mais la distribution des amplitudes est très différente. Nous observons aussi une différence importante dans la bande de fréquence [0.7-2 Hz] liée à la fréquence cardiaque. Il existe donc une implication possible des pulsations thermiques cardiovasculaires au niveau des artères ophtalmiques. Il est donc nécessaire d'intégrer dans l'analyse de la thermographie du visage de régionaliser les différentes zones ce qui n'est pas le cas avec une méthode plus intégrative telle que la VTC de Frei-Chen (analyse globale sans a priori spatial des pixels détectés).

5. Conclusion

En conclusion, cette méthodologie de mesure s'intègre dans une demande sociétale forte pour obtenir des mesures sur l'homme qui soient sans contraintes, sans douleurs, en conditions réelles ou simulées. Cette analyse s'appuie sur la connaissance des mécanismes physiologiques et du système vasculaire non cutané ainsi que sur des protocoles expérimentaux pointus (stress climatique, stress physiologiques, état émotionnel et cognitif...). Des outils d'analyse ont été développés pour appréhender : (1) l'aspect spatial 2D des variations thermiques pour évaluer les disparités thermiques entre les régions du visage (mesure d'asymétrie, pertes thermiques par région ...). (2) L'aspect spatio-temporel 2D+t (mécanisme de thermorégulation, fréquence cardiaque et respiratoire, quantité de déplacement ...). A terme, la mesure et l'analyse fines de la variabilité de la température cutanée du visage par thermographie permettront la mise en évidence de « signature » de phénomènes non thermiques et de phénomènes thermo-vasculaires spécifiques.

Références

- [1] S. Sunderman. et I. Osorio, Mesial Temporal Lobe Seizures may Activate Thermoregulatory Mechanism in Humans: an Infrared Study of Facial Temperature, *Epilepsy & Behaviour*, Academic Press 4 (2003), 399-406.
- [2] F.J. Prokoski, R.B. Riedel et J.S. Coffin, Identification of Individuals by Means of Facial Thermography, *Security Technology, Crime Countermeasures, Proceedings IEEE* (1992), 120-125.
- [3] M. Anbar et S. Dapos Arcy, Localized Regulatory Frequencies of Human Skin Temperature Derived from The Analysis of Series of Infrared Images, *Computer-Based Medical Systems, Proceedings of the Fourth Annual IEEE* (12-14 Mai 1991), 184-191.
- [4] A. Dittmar, G. Delhomme et T. Pauchard, La Thermique de L'Homme et Son Proche Environnement, *Actes du Congrès Annuel de la Société Française des Thermiciens*, LET/ENSMA, Poitiers, France, (17-18-19 mai 1995).
- [5] J.P. Martineaud et S. Seroussi, Physiologie de la circulation cutanée, *éditeur Masson* (1977), 116.
- [6] T. Söderström, A. Stefanovska, M. Veber et H. Svensson, Involvement of Sympathetic Nerve Activity in Skin Blood Flow Oscillation in humans, *Am. J. Physiol. Heart Circulation Physiology*, vol. 284 (2003), 1638-1646.
- [7] J.D. Hardy, Heat Transfert, *Physiology of Heat Regulation and The Science of Clothing*, édité par L.H. Newburgh (1949), chapitre 3, réédition (1968), 78-108.
- [8] I. Fujimasa, Pathological Expression and Analysis of Far Infrared Thermal Images, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 17, 4 (juillet / aout 1998), 34-42.
- [9] C.K. Eveland, D.A. Socolinsky et Wolff L.B., Tracking human faces in infrared video, *Image and Computing Vision*, vol. 21 (2003), 579-590.
- [10] Y.V Gulyaev, A.G. Markov, L.G. Koreneva et P.V. Zakharov, Dynamical Infrared Thermography in Humans, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 14 (novembre/décembre 1995), 579-590.
- [11] M. Garbey, N. Sun, A. Merla et I. Pavlidis, Contact-Free Measurement of Cardiac Pulse Based on the Analysis of Thermal Imagery, *Technical Report Number UH-CS-04-08* (décembre, 2004).
- [12] H. Genno, K. Ishikawa, O. Kanbara, M. Kikumoto, Y. Fujiwara, R. Suzuki et M. Osumi, Using Facial Skin Temperature to Objectively Evaluate Sensations, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 19 (1997), 161-171.
- [13] O. Barnea et V. Shusterman, Analysis of Skin-Temperature Variability compared to Variability of Blood Pressure and Heart Rate, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 2 (1995), 766-771.
- [14] E.K.Y. Chan et Pearce J.A., Visualisation of Dynamic Subcutaneous Vasomotor Response by Computer-Assited Thermography, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, vol. 37, n° 8 (aout 1990), 786-795.