

BANC D'ETALONNAGE DES THERMOMETRES AURICULAIRES AU LNE

J-O. Favreau, F. Ollier, D. Jouin, P. Ridoux, J-R. Filtz
Centre de Métrologie Scientifique et Industrielle
Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
1, rue Gaston Boissier
75015 Paris

Résumé

Les thermomètres auriculaires permettent de mesurer la température du corps humain. L'évaluation de ces thermomètres nécessite un banc spécifique d'étalonnage matérialisant de façon représentative les conditions thermiques d'un conduit auditif.

Une « oreille thermique artificielle » matérialisée par une cavité rayonnante de type corps noir a été récemment développée et caractérisée au laboratoire. Les principales spécifications métrologiques sont présentées dans cet article.

Enfin, une procédure d'étalonnage a été élaborée et mise en œuvre lors d'une campagne d'évaluation de certains de ces thermomètres.

Abstract

Infrared ear thermometers enable measuring the human temperature. The calibration of these thermometers requires a specific set-up of calibration realizing in a representative way the thermal conditions of an auditory canal.

An "artificial thermal ear" materialized by a blackbody cavity was recently developed and characterized at Lne.

Specifications are presented in this article.

A procedure of calibration was elaborated and implemented during a campaign of evaluation of some ear thermometers.

Introduction

La température du corps humain peut être déterminée par plusieurs méthodes correspondant à différentes sites corporels. Les plus traditionnelles (rectale, axillaire, buccale) reposent sur des thermomètres de contact avec des inconvénients bien connus alors que les plus récentes (auriculaire, frontale) sont basées sur une mesure de rayonnement thermique.

La cavité auriculaire étant irriguée par les mêmes flux sanguins que l'hypothalamus, centre de régulation thermique du corps, la température de cette cavité est donc très représentative de la température humaine. De plus, l'oreille n'est pas affectée par la respiration ou l'alimentation du patient.

Le conduit auditif de longueur 35 mm et de diamètre 7 mm approximativement est fermé par la membrane tympanique faisant un angle d'environ 30°. Ce volume chauffé par rayonnement de l'épiderme du méat auditif a une homogénéité d'environ 0,6 °C. Cet espace confiné, thermiquement, peu perturbé par la convection ou le rayonnement externe, présente des similitudes avec une

cavité rayonnante de type corps noir, servant de référence pour l'étalonnage des pyromètres industriels. Par analogie la cavité auriculaire peut servir de référence pour le capteur mesurant le rayonnement thermique émis par la membrane tympanique. Il est appelé thermomètre tympanique ou auriculaire en référence au site de mesure. L'embout du thermomètre auriculaire souvent protégé par un couvre-sonde jetable est introduit dans le conduit auditif. La mesure de température est rapide, simple et non invasive.

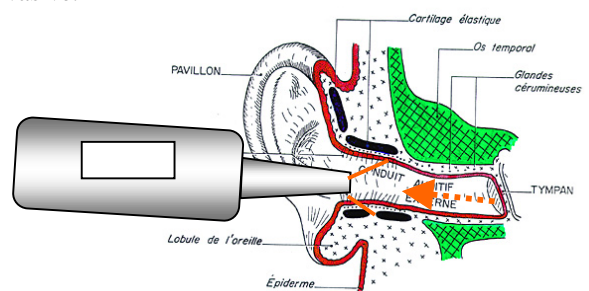


Figure 1: Principe de mesure d'un thermomètre auriculaire

Cependant, des problèmes de fiabilité de la mesure ont été observés lors d'études cliniques [1,2]. Ils peuvent provenir de la présence de cérumen, de poils, de sueur, de la courbure du conduit auditif, du mauvais positionnement du thermomètre, de la qualité du détecteur, d'un mauvais algorithme de calcul... Une évaluation métrologique [3] de certains thermomètres a fait apparaître également des erreurs de justesse supérieures à la limite imposée de 0,2 °C dans les normes internationales [4,5,6].

Pour permettre l'évaluation de ces capteurs le LNE a développé un générateur de température ayant des caractéristiques thermiques proches de l'oreille.

Eléments de théorie

Un corps noir est constitué d'une cavité, vide, en équilibre thermodynamique et de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde considérée. La théorie précise que l'énergie électromagnétique rayonnée à l'intérieur de la cavité ne dépend que de la température et de la longueur d'onde. La répartition de cette énergie en fonction de la longueur d'onde à la température de 37 °C est présenté sur la figure 2. La loi de Wien nous indique que le maximum d'émission est obtenu dans ce cas à 9,3 µm. L'émissivité d'un corps noir est égale à 1 par définition. La réalisation pratique d'une cavité rayonnante de type corps noir (appelé corps noir par simplification dans la suite du texte) consiste à réaliser une ouverture pour son utilisation et conduit de ce fait à une émissivité toujours inférieure à 1.

La réponse spectrale d'un thermomètre auriculaire doit correspondre à la plage de températures d'utilisation de 35°C à 42°C.

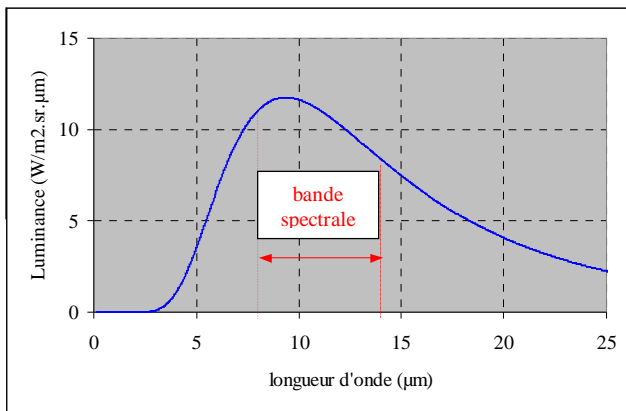


Figure 2 : Loi de Planck pour le corps noir à 37 °C

Amélioration du banc d'étalonnage

Le LNE possède depuis quelques années un corps noir auquel des améliorations ont été apportées pour en faciliter l'utilisation. Récemment, un deuxième corps noir a été fabriqué. Ces deux corps noirs sont conformes à la description de la norme américaine (ASTM) pour le premier et de la norme européenne pour le second (EN). Les cavités sont réalisées en cuivre d'épaisseur 1,5 mm, et les parois internes sont recouvertes de peinture Nextel Velvet® 811-21. Ce traitement de surface et la géométrie des cavités permettent d'obtenir une émissivité apparente supérieure à 0,999 [7].

Ces cavités sont fixées verticalement sur un support (figure 3) permettant un positionnement précis et facilitant l'insertion des thermomètres à étalonner. Ce système permet le contrôle visuel du niveau d'eau à travers le plexiglas dont la face doit être léchée par l'eau.

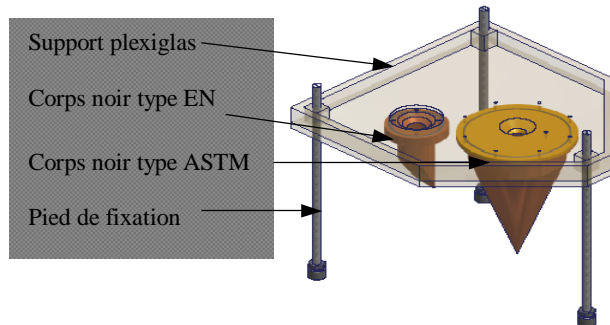


Figure 3 : Support avec les deux corps noirs

Ce montage est introduit dans un bain thermostaté de vingt litres garantissant l'homogénéité et la stabilité thermique de chacune des cavités. Cet ensemble constitue le banc d'étalonnage des thermomètres auriculaires. Chacune des « oreilles thermiques artificielles » permet de générer une température comprise entre 35 °C et 42 °C.

Caractérisation du dispositif de mesure

La caractérisation a consisté en l'évaluation thermique, dans un premier temps, du bain thermostaté seul, puis dans un second temps de l'ensemble instrumenté des cavités en place [8].

Elle a été réalisée avec deux types de chaînes de mesure de température ; à savoir une chaîne étalon, étalonnée dans l'Echelle Internationale de Température (EIT-90) permettant des mesures avec des incertitudes de 0,005 °C et neuf sondes étalonnées de type Pt100Ω associées à un multimètre. Un logiciel d'acquisition permet les mesures simultanées des neuf sondes, avec une incertitude de mesure de 0,014 °C. Pour réduire ces incertitudes la méthode de la double pesée de Gauss [9] a été utilisée.

Des mesures ont été réalisées pour plusieurs configurations du bain, en faisant varier l'agitation, la fixation du support sans les cavités, en rajoutant des déflecteurs d'angle, en générant des courants d'air. Les meilleures conditions d'utilisation du bain ont ainsi pu être définies. L'agitation doit être vers le fond du bain, les déflecteurs doivent être utilisés, le maintien du support (sur pieds ou par suspension) n'a pas d'influence, il ne doit pas y avoir de courants d'air (supérieur à 0,4 m/s)...

Pour définir un espace de travail permettant de s'affranchir de l'influence des parois, des sondes ont été placées verticalement puis horizontalement pour des températures de bain de 35 °C et 42 °C. La figure 4 matérialise l'espace de travail vertical. La zone indiquée présente une homogénéité d'un centième de degré à 35 °C. Pour obtenir une telle spécification, le volume du bain situé à 3 cm des bords ne doit pas être considéré.

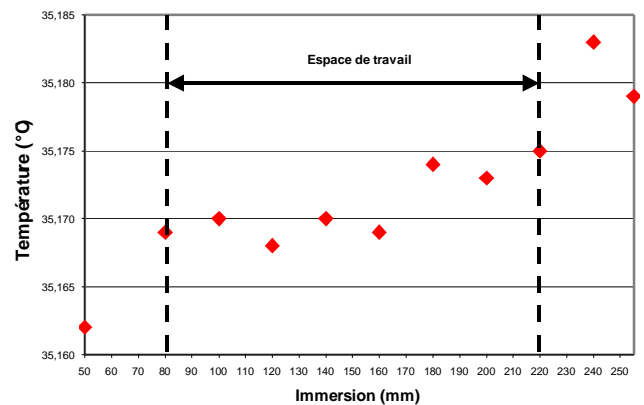


Figure 4 : Espace de travail vertical à 35°C

Pour la suite des essais, nous avons placé les sondes aux huit angles du volume de travail, la neuvième étant placée au centre à côté de la chaîne étalon. L'analyse des enregistrements a permis d'établir que la stabilisation du bain à la température de consigne était atteinte après 35 minutes.

De plus, le dépouillement des mesures en régime établi (après une heure de stabilisation) a permis de dresser la cartographie thermique du bain d'eau à 35 °C, 37 °C et 42 °C. Ces mesures étant réalisées pendant deux heures, nous en déduisons la stabilité et l'homogénéité du bain d'eau. Un exemple d'évolution de la stabilité thermique en

fonction du temps, obtenue avec l'une des neuf sondes, est donné figure 5.

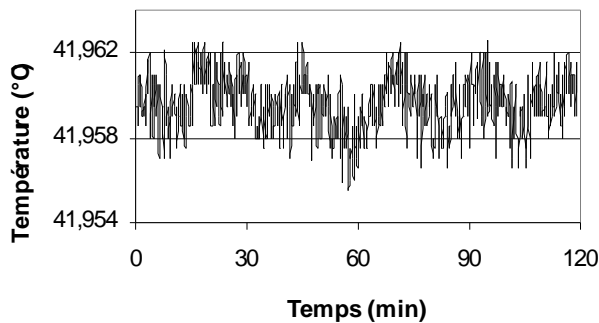


Figure 5 : Stabilité du bain sur deux heures à 42°C

Pour la plage de température de 35 à 42°C, nous obtenons un écart-type de stabilité égal à 0,004 °C et un écart maximal d'homogénéité de 0,015 °C. Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus par d'autres laboratoires nationaux [10,11,12].

Une caractérisation complémentaire a été effectuée en présence des cavités afin de s'assurer du maintien des performances du bain. Les cavités sont placées au centre, à l'intérieur de l'espace de travail précédemment défini. Nous avons fait varier leurs positions dans le bain, ainsi que l'agitation de l'eau pour définir les meilleures conditions thermiques. Il en résulte que si les cavités sont en quinconces et l'eau en contact avec la face immergée du support, alors l'homogénéité et la stabilité thermique du bain ne sont pas dégradées.

La norme [4bis] préconise de déduire la température du corps noir de la mesure de la température de l'eau du bain, en s'appuyant implicitement sur une très faible résistance thermique de la paroi de la cavité (matériau de forte conductivité et de faible épaisseur).

Une vérification a été réalisée, en fixant à l'arrière du fond du corps noir type EN, un manchon en cuivre instrumenté de quatre sondes. L'écart entre la température de la sonde de référence dans le bain et ces quatre sondes n'est pas significatif; l'incertitude élargie étant de 0,014°C.

Cette caractérisation a permis de déterminer le budget des corrections et des incertitudes concernant les moyens d'étalonnage :

$$T_{CN} = T_e + \sum_{i=1}^6 C_i$$

où :

- T_{CN} : température rayonnée par le corps noir
- T_e : température lue par la chaîne étalon
- C_1 : correction due à la résolution de la chaîne étalon
- C_2 : correction due à l'étalonnage de la chaîne étalon
- C_3 : correction due à la dérive de la chaîne étalon
- C_4 : correction due à la stabilité du bain
- C_5 : correction due à l'homogénéité du bain
- C_6 : correction due à la différence entre la température du corps noir et celle du bain.

Les facteurs correctifs sont tous pris égaux à zéro car négligeables; les incertitudes-type associées sont résumées dans le tableau 1.

Symbole	Estimation (°C)	Incertitude type (°C)	Loi de distribution.	Coefficient de sensibilité	Contribution (°C)
T_e	37,133	0,001	normale	1	0,001
C_1	0	0,0003	rectangle	1	0,0003
C_2	0	0,0015	normale	1	0,0015
C_3	0	0,0015	rectangle	1	0,0015
C_4	0	0,004	normale	1	0,004
C_5	0	0,015	rectangle	1	0,015
C_6	0	0,014	normale	1	0,007
$u [T_{(CN)}]$					0,018

Tableau 1 : Incertitude-type composée sur la température de la cavité rayonnante (hors contribution de l'émissivité)

Pour une cavité isotherme d'émissivité apparente égale à 0,999 dans la bande 8-15 µm, la correction de température à effectuer sur la température mesurée par contact est estimée par calcul à 0,018 °C ± 0,009 °C à la température de 42 °C, en prenant en compte le rayonnement ambiant à 23 °C. L'incertitude-type totale sur la température rayonnée par la cavité est obtenue à partir d'une somme quadratique des composantes précédentes valant 0,018°C et 0,009°C à 42°C.

En final, l'incertitude totale élargie sur la température de chaque corps noir type EN ou ASTM est inférieure à 0,05°C sur la plage définie par la norme (35 °C à 42 °C).

Résultats d'étalonnage d'un lot de dix thermomètres auriculaires

Les détecteurs utilisés dans les thermomètres auriculaires sont le plus souvent des thermopiles dont la température de la jonction de référence (ou jonction froide) est fortement liée à la température interne du boîtier du thermomètre. Afin de limiter l'influence thermique de l'opérateur après une préhension prolongée de l'appareil, le mode opératoire est le suivant :

- mise en fonctionnement du thermomètre
- positionnement devant l'ouverture du corps noir
- lecture de la valeur indiquée (appelé "relevé" dans [4bis])
- retrait de l'appareil reposé sur une table
- attente de 15 secondes avant une nouvelle mesure et ainsi de suite jusqu'à obtenir dix relevés.

L'erreur de justesse E_j du thermomètre est estimée par la différence entre la moyenne de 10 relevés et la température de luminance du corps noir mesurée par la chaîne étalon.

L'incertitude finale U ($k=2$) tient compte des contributions des moyens mis en œuvre (0,041 °C), de la résolution δ du thermomètre (0,1 °C en général), et de sa répétabilité caractérisé par l'écart-type sur la moyenne (s est l'écart-type expérimental) :

$$U = 2 \sqrt{u^2(T_{cn}) + \frac{s^2}{10} + \frac{\delta^2}{12}}$$

A minima, l'incertitude d'étalonnage vaut 0,07 °C lorsque les 10 relevés sont identiques.

Conclusion

Cette approche est couramment employée dans un laboratoire de métrologie mais il faut noter que l'approche recommandée dans la norme [4bis] ne prend pas en compte l'incertitude de mesure due au thermomètre. La conformité est établie si l'erreur maximale déduite d'au moins 3 relevés est inférieure ou égale à la valeur limite de $\pm 0,2$ °C appelée "erreur maximale admissible".

Concernant les moyens d'étalonnage, la norme EN exige que la température rayonnée par la cavité corps noir soit définie avec une incertitude totale inférieure à $\pm 0,07$ °C.

Dans le cas d'une approche « métrologie », la conformité est établie si $|E_j| + U = EMT$ (Erreur Maximale Tolérée).

Afin d'estimer la disparité dans un lot de thermomètres, une évaluation de 10 appareils de même type a été effectuée avec le mode opératoire défini précédemment. Les mesures ont été traitées selon les deux approches "métrologie" et "norme" décrites ci-dessus.

Les résultats à 37,5 °C et 42 °C, présentés respectivement en Figures 7 et 8, font apparaître que les conclusions sur la classification de ces appareils sont concordantes avec l'une ou l'autre approche, sous réserve d'un nombre suffisant de relevés (supérieur ou égal à 10).

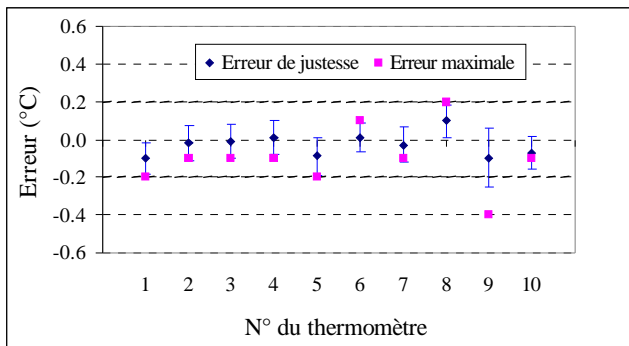


Figure 7 : Erreurs de justesse et maximale pour 10 thermomètres auriculaires à 37,5 °C

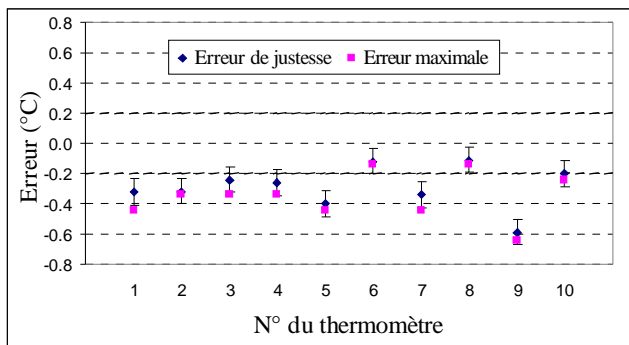


Figure 8 : Erreurs de justesse et maximale pour 10 thermomètres auriculaires à 42 °C

Le banc d'étalonnage des thermomètres auriculaires du LNE est dorénavant d'une cavité corps noir conforme à la norme européenne EN 12470-5.

L'incertitude élargie ($k=2$) provenant des moyens mis en œuvre pour déterminer la température rayonnée par une cavité a été estimée à 0,05 °C sur la plage utile de température (35 °C à 42 °C)

L'évaluation d'un lot de dix thermomètres auriculaires de même type a été réalisée selon l'approche de la norme avec la notion d'erreur maximale pour chaque relevé et selon une approche métrologique classique avec les notions de moyenne et d'écart-type. Les résultats sont concordants en terme de conformité des appareils dans la mesure où un nombre suffisant de relevés a été effectué.

Remerciements

Nous remercions vivement Thierry Deuzé du LNE pour son assistance technique dans la réussite de ce projet ainsi que Fanny Beucher, stagiaire de l'université de Créteil, pour sa contribution aux différentes expérimentations.

Références

- [1] I.Sermet-Gaudelus, I.Chadelat, G.Lenoir, « La mesure de la température en pratique pédiatrique quotidienne », *Archives de pédiatrie* 2005, vol 12, pp 1292-1300.
- [2] A.Heusch, PW. McCarthy, "The patient: A novel source of error in clinical temperature measurement using infrared aural thermometry", *Journal of alternative and complementary medicine* NY 2005, vol 11, pp 473-476.
- [3] I.Pusnik, J.Drnovsek, « Infrared ear thermometers-parameters influencing their reading and accuracy » *Physiological Measurement* 2005, vol 26, pp1075-1084.
- [4] EN 12470-5, "Clinical thermometers - part 5 : Performance of infra-red ear thermometers (with maximum device)", 2003, CEN, Brussels.
- [4bis] NF EN 12470-5, "Thermomètres médicaux partie 5 : Performance des thermomètres auriculaires (avec dispositif à maximum)", 2003, CEN, Bruxelles.
- [5] ASTM E 1965-98 (reapproved 2003) : "Standard Specification for infrared thermometers for intermittent determination of patient temperature."
- [6] JIS T 4207, 2005: Japanese Industrial Standard: "infrared ear thermometers."
- [7] J.Ishii, T.Fukuzaki, T. Kojima, A. Ono, « Calibration of infrared ear thermometer » *Tempmeko* 2001, pp729-734.

[8] F.Beucher, « Evaluation métrologique d'un bain d'étalonnage pour thermomètres médicaux » Rapport de stage LNE 15 juin 2006.

[9] JC.Courtier, P.Giacomo « vocabulaire de la mesure » Technique de l'ingénieur dos R113 ; § 3.1.5.2.

[10] I.Pusnik, E.van der Ham, J.Drnovsek, « Comparison of blackbody cavities for calibration of Infrared ear thermometers », Tempmeko, 2004, vol 2, pp 823-826.

[11] H.McEvoy, R.Simpson, G.Machin, « New blackbody standard for the evaluation and calibration of tympanic ear thermometers at the NPL, United Kingdom» NPL.

[12] J.Ishii, T.Fukuzaki, H.C. MacEvoy, R.Simpson, G.Machin, J.Hartmann, B.Gutschwager, J.Hollandt « A comparison of the blackbody cavities for Infrared ear thermometers of NMIJ,NPL and PTB» Tempmeko 2004, pp1093-1098.