Ergonomie — Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques

Ce document dont je fus le rédacteur principal (Prof. J. Malchaire) a fait l'objet d'une norme internationale 9886. Etant donné que je n'ai jamais été rémunéré pour ce travail et que je n'ai cédé les droits d'auteur à personne, je considère que j'ai le droit de le diffuser le document qui servi de base à l'édition de la norme ISO 9886.

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit les méthodes de mesurage et d'interprétation des paramètres physiologiques suivants:

- la température corporelle centrale;
- les températures cutanées;
- la fréquence cardiaque;
- la perte de masse corporelle.

Le choix des grandeurs à mesurer et des techniques à utiliser est laissé à l'appréciation des personnes responsables de la santé des travailleurs. Ces personnes auront à tenir compte non seulement de la nature des conditions thermiques, mais aussi du degré d'acceptation de ces techniques par les travailleurs concernés.

II y a lieu d'insister sur le fait que des mesurages directs sur l'individu ne peuvent être réalisés qu'à deux conditions:

a. lorsque la personne a été informée en détail de l'inconfort et des risques éventuels associés à la technique de mesurage et consent librement à de tels mesurages;
b. lorsque les mesurages ne présentent pour la personne aucun risque qui soit inacceptable compte tenu des codes d'éthique généraux ou spécifiques.

Afin de faciliter ce choix, l'Annexe A présente une comparaison des différentes méthodes en ce qui concerne leur domaine d'application, leur complexité technique et la gêne et les risques qu'elles peuvent entraîner.

La norme définit les conditions à remplir pour assurer la fiabilité des informations recueillies à partir des différentes méthodes. Les techniques de mesurage sont exposées en Annexe B. Les valeurs limites sont proposées en Annexe C (informative).

La norme ne concerne pas les conditions expérimentales dans lesquelles des chercheurs peuvent être amenés à développer des méthodes alternatives destinées à affiner les connaissances dans ce domaine. II est cependant recommandé que, lors de ces études en laboratoire, les méthodes décrites ci-dessous soient utilisées à titre de référence, de sorte que les résultats puissent être comparés.

Avant d'utiliser les méthodes d'évaluation décrites dans la présente Norme internationale, l'utilisateur doit observer les règles déontologiques et juridiques en vigueur dans son pays ou son institution. Par conséquent, il consultera les comités de déontologie et observera strictement les règles relatives au libre consentement écrit, à la liberté de participation, à la confidentialité, etc.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 7933, Ambiances thermiques chaudes — Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise

3 Symboles et termes abrégés

A_{Du}	surface du corps calculée selon la formule de Du Bois (m^2)
HR	fréquence cardiaque (battements·min^{-1})
HR_0	fréquence cardiaque moyenne (battements·min^{-1}) du sujet au repos, en position assise dans des conditions thermiques neutres
HR_r	fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) lors d'une pause pendant le travail, après que les composantes de la fréquence cardiaque dues aux efforts statiques et au travail musculaire dynamique aient disparu
HR_L	limite de la fréquence cardiaque (battements·min^{-1})
ΔHR_M	élévation de la fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) liée au métabolisme de travail
ΔHR_S	élévation de la fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) liée à la production d'efforts musculaires statiques
ΔHR_T	élévation de la fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) liée à l'astreinte thermique subie par le sujet
ΔHR_N	élévation de la fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) due à des facteurs psychologiques
ΔHR_ε	composante résiduelle dans la fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) liée au rythme de la respiration, au rythme circadien, etc.
I_{cl}	isolement thermique du vêtement (clo)
k_i	coefficient de pondération d'un point de mesurage
Δm	variation de la masse corporelle
M	métabolisme énergétique moyen (W/m^2)
Δm_{clo}	variation de la masse due à la variation du vêtement ou à l'accumulation de sueur dans celui-ci
Δm_g	perte brute de masse corporelle
Δm_0	perte de masse due à la différence de masse entre le dioxyde de carbone et l'oxygène
Δm_{res}	perte de masse due à l'évaporation dans les voies respiratoires
Δm_{sol}	variation de la masse due à la prise (nourriture) et à l'excrétion (matières fécales) de solides
Δm_{sw}	perte de masse due à la perte sudorale durant l'intervalle de temps donné
Δm_{wat}	variation de la masse corporelle due à la prise et à l'excrétion (urine) d'eau
p_a	pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (kPa)
R	quotient respiratoire (sans dimension)
Δt	intervalle de temps (min)
t_{ab}	température intra-abdominale (°C)
t_{ac}	température du conduit auditif (°C)

t_{cr}	température corporelle centrale (°C)
t_{es}	température œsophagienne (°C)
t_{or}	température buccale (°C)
t_{re}	température rectale (°C)
t_{sk}	température cutanée (°C)
t_{ski}	température cutanée locale au point i (°C)
t_{ty}	température tympanique (°C)
t_{ur}	température urinaire (°C)

4 Mesurage de la température corporelle centrale (tcr)

4.1 Généralités

Le terme «noyau» («parties profondes») fait référence à l'ensemble des tissus situés assez profondément pour ne pas être affectés par un gradient de température à travers les tissus superficiels. Toutefois, à l'intérieur du noyau, des différences de température sont possibles en fonction des métabolismes locaux, de la densité des réseaux vasculaires et des variations locales de débit sanguin. La température du noyau n'est donc pas une grandeur unique et mesurable en tant que telle. Cette température peut être approchée par la mesure de la température en différentes parties du corps:

- l'œsophage: température œsophagienne (tes);
- le rectum: température rectale (tre);
- le tractus gastro-intestinal: température intra-abdominale (tab);
- la bouche: température buccale (tor);
- le tympan: température tympanique (tty);
- le conduit auditif: température du conduit auditif (tac);
- la température urinaire (tur).

L'ordre de présentation de ces différentes techniques a été adopté uniquement pour la simplicité de l'exposé. En fonction de la technique adoptée, la température mesurée peut refléter

- la température moyenne de la masse corporelle, ou
- la température du sang irriguant le cerveau et dès lors influençant les centres de thermorégulation de l'hypothalamus. Cette température est habituellement considérée comme décrivant l'astreinte thermique subie par le sujet.

4.2 Techniques de mesurage des indicateurs de la température corporelle centrale

4.2.1 Température œsophagienne (t_{es})

4.2.1.1 Principe de la méthode

Le capteur de température est introduit dans la partie inférieure de l'œsophage qui est en contact sur une longueur de 50 mm à 70 mm avec la face antérieure de l'oreillette gauche et la face postérieure de l'aorte descendante. Placé à ce niveau, le capteur de température enregistre les variations de la température du sang artériel avec un temps de latence très court.

Dans sa partie supérieure, l'œsophage est appliqué contre la trachée et la mesure de température à ce niveau est influencée par la ventilation. À l'inverse, si le capteur est placé trop bas, il enregistre la température

gastrique.

Le capteur est également influencé par la température de la salive avalée par le sujet. La température œsophagienne est dès lors donnée non par la valeur moyenne des températures enregistrées, mais par les valeurs de pointe. Ceci est particulièrement important dans le cas d'environnements froids où la salive peut être fraîche.

4.2.1.2 Interprétation

De toutes les mesures indirectes de t_{cr} mentionnées en 4.2.1.1, t_{es} est celle qui reflète le mieux les variations de température du sang artériel à la sortie du cœur, et très probablement la température du sang irriguant les centres de thermorégulation dans l'hypothalamus.

4.2.2 Température rectale (t_{re})

4.2.2.1 Principe de la méthode

Le capteur de température est introduit dans le rectum; celui-ci étant entouré d'une masse importante de tissus abdominaux de faible conductibilité thermique, la température rectale est indépendante des conditions ambiantes.

4.2.2.2 Interprétation

Lorsque le sujet est au repos, la température rectale est la plus élevée des températures corporelles. À l'inverse, lorsque le sujet est au travail, t_{re} est directement influencée par la production de chaleur des muscles locaux: à dépense énergétique égale par unité de temps, t_{re} est plus élevée lorsque le travail est effectué avec les jambes que lorsqu'il est réalisé exclusivement avec les bras.

t_{re} reflète essentiellement la température moyenne de la masse corporelle. Elle ne peut être considérée comme un indicateur de la température du sang et dès lors de la température des centres de thermorégulation, que pour autant que l'accumulation de chaleur soit lente et que le travail concerne le corps entier.

En cas d'accumulation lente et lorsque le travail est essentiellement effectué avec les jambes, la mesure de t_{re} conduit à une légère surévaluation de la température des centres de thermorégulation.

À l'inverse, en cas d'accumulation rapide, lors d'une contrainte thermique intense et de courte durée, t_{re} s'élève plus lentement que la température des centres de thermorégulation, poursuit son élévation au-delà du temps d'exposition pour enfin décroître progressivement. Les vitesses d'augmentation et les retards sont fonction des conditions d'exposition et de récupération. Dans ces cas, la valeur de t_{re} est inappropriée pour l'évaluation de l'astreinte subie par la personne.

4.2.3 Température intra-abdominale (t_{ab})

4.2.3.1 Principe de la méthode

Un capteur de température est ingéré par le sujet. Durant son transit par le tube digestif, la température mesurée va varier suivant que le capteur est localisé dans une zone proche de gros vaisseaux artériels ou d'organes ayant un métabolisme local important ou, au contraire, près des parois abdominales.

4.2.3.2 Interprétation

Lorsque le capteur est dans l'estomac ou le duodénum, les variations de température observées sont similaires à celles de t_{es} et la différence entre ces deux températures est très faible. Au fur et à mesure que le capteur progresse dans l'intestin, les caractéristiques de la température mesurée se rapprochent de celles décrites pour t_{re}. Dès lors, l'interprétation dépend du temps écoulé depuis l'ingestion du capteur et de la vitesse du

transit gastro-intestinal chez l'individu étudié.

Dans l'état actuel des connaissances, t_{ab} semble être indépendante des conditions climatiques extérieures, sauf en cas d'exposition de l'abdomen à un flux intense de rayonnement.

4.2.4 Température buccale (t_{or})

4.2.4.1 Principe de la méthode

Le capteur est placé sous la langue et est donc en contact avec les branches profondes de l'artère linguale. Il permet dès lors une mesure satisfaisante de la température du sang influençant les centres de thermorégulation.

Néanmoins, la température mesurée dépend des conditions extérieures. Lorsque la bouche est ouverte, les échanges thermiques par convection et évaporation à la surface des muqueuses buccales contribuent à abaisser la température de la cavité buccale. Même lorsque la bouche est fermée, la température peut être significativement abaissée en fonction d'une diminution de la température cutanée de la face, ou élevée lorsque la face est exposée à un flux intense de rayonnement thermique.

4.2.4.2 Interprétation

Lorsque les conditions de mesurage sont respectées, t_{or} est très proche de t_{es}. Chez le sujet au repos et dans des ambiances où la température de l'air est supérieure à 40 °C, t_{or} peut surestimer t_{es} de 0,25 °C à 0,4 °C. Chez le sujet au travail, la concordance entre t_{or} et t_{es} n'est établie que pour les niveaux d'efforts musculaires ne dépassant pas 35 % de la puissance aérobie maximale du sujet.

4.2.5 Température tympanique (t_{ty})

4.2.5.1 Principe de la méthode

Cette méthode a pour objet de mesurer la température de la membrane tympanique dont la vascularisation provient, pour une part, de l'artère carotide interne, qui irrigue également l'hypothalamus. L'inertie thermique du tympan étant faible, de par sa faible masse et son importante vascularisation, sa température suit les variations de la température du sang artériel, qui influence les centres de thermorégulation.

Cependant, la membrane tympanique étant également vascularisée par l'artère carotide externe, sa température est influencée par les échanges thermiques locaux dans le territoire vascularisé par cette artère. Le contact d'un capteur avec la membrane tympanique (ou la zone l'entourant) étant douloureux, soit la sonde thermique est placée aussi près que possible de la membrane tympanique ou sa température est mesurée par un dispositif à rayonnement infrarouge (IR) propre à mesurer la température superficielle et dirigé vers la membrane. Cependant, la méthode à rayonnement infrarouge rencontre souvent d'importants problèmes dans la pratique (voir B.1.6).

4.2.5.2 Interprétation

t_{ty} présente des variations parallèles à celles de t_{es} lors des variations rapides du contenu thermique du noyau, que celles-ci soient d'origine métabolique ou dues à l'environnement. L'écart observé entre ces deux températures, ou entre t_{ty} et t_{re}, est toutefois influencé par les échanges de chaleur autour de l'oreille et de la surface cutanée de la tête.

4.2.6 Température du conduit auditif (t_{ac})

4.2.6.1 Principe de la méthode

Le capteur est dans ce cas placé contre les parois du méat auriculaire, à proximité immédiate du tympan.

Celles-ci sont vascularisées à partir de l'artère carotidienne externe et leur température est influencée à la fois par la température du sang artériel dans le cœur et par les variations du débit sanguin cutané au niveau de l'oreille et du cuir chevelu. Un gradient de température est par conséquent observé entre le tympan et l'orifice externe du méat auriculaire. Ce gradient peut être réduit en isolant de manière appropriée l'oreille du climat extérieur.

4.2.6.2 Interprétation

Les règles d'interprétation sont semblables à celles présentées pour la température tympanique. La température du conduit auditif présente donc, comme t_{ty}, des variations parallèles à celles de t_{es}.

Cependant, les écarts positifs observés en ambiance très chaude ou les écarts négatifs observés en ambiance froide par rapport à t_{es} sont systématiquement plus élevés que ceux observés pour t_{ty}. Par conséquent, t_{ac} peut être considérée plutôt comme un indicateur des températures combinées du noyau et de la peau que comme un indicateur de la température du noyau seulement.

Ce site de mesurage de la température est accepté par certains comme un compromis indispensable entre la précision de l'évaluation et la facilité d'utilisation pour le porteur et l'observateur.

4.2.7 Température urinaire (t_{ur})

4.2.7.1 Principe de la méthode

La vessie et son contenu peuvent être considérés comme faisant partie du noyau du corps. Le mesurage de la température de l'urine lors de la miction parait donc susceptible de renseigner sur le niveau de la température t_{cr}. Le mesurage est réalisé au moyen d'un capteur de température introduit dans un dispositif de recueil de l'urine. Par définition, la réalisation du mesurage est dépendante du degré de remplissage vésical.

4.2.7.2 Interprétation

La température urinaire présente des variations parallèles à celles de t_{re}, mais la constante de temps est quelque peu supérieure. En valeur réelle, t_{ur} est systématiquement inférieure à t_{re} de 0,2 °C à 0,5 °C.

5 Mesure de la température cutanée (t_{sk})

5.1 Généralités

La température mesurée à la surface de la peau varie fortement sur toute la surface corporelle et ce d'autant plus que les conditions ambiantes sont froides. Pour cette raison, il convient de distinguer

- la température cutanée locale (tsk) mesurée en un point spécifique de la surface du corps, et
- la température cutanée moyenne (tsk) sur la surface entière du corps, qui est difficilement mesurable directement, mais peut être estimée en pondérant un certain nombre de températures cutanées locales en fonction des surfaces qu'elles caractérisent.

En elle-même, t_{sk} ne permet pas d'évaluer l'astreinte physiologique d'origine thermique. Elle constitue en revanche un critère important pour l'évaluation des conditions de confort thermique.

5.2 Principe de la méthode

Chez un sujet nu, la température en un point quelconque de la surface corporelle peut être mesurée à distance au moyen d'un capteur de rayonnement infrarouge. Cette technique donne la température moyenne sur la surface plus ou moins grande de la peau interceptée par le capteur. À défaut, la température est mesurée par contact au moyen d'un capteur de température fixé sur la peau.

5.3 Interprétation

La température cutanée est influencée par

- les échanges thermiques par conduction, convection, rayonnement et évaporation à la surface de la peau, ainsi que
- les variations de débit sanguin cutané et de température du sang artériel en ce point particulier du corps.

En ambiance sèche, la température cutanée répond, avec une constante de temps d'environ 3 min, aux variations de température d'air, de rayonnement et de vitesse d'air ambiantes.

Il convient de choisir le nombre de points de mesurage en fonction du degré de précision souhaité, des conditions ambiantes, des exigences techniques et de la gêne occasionnée, tolérée par le sujet.

Étant donné que les températures à la surface du corps sont très hétérogènes en ambiances proches de la neutralité thermique, et a fortiori en ambiances froides, il convient d'utiliser des schémas de pondération avec de nombreux points de mesurage. En ambiances très froides, le mesurage de la température d'un ou de plusieurs doigts ou d'un ou plusieurs orteils des deux côtés du corps peut être requis pour des raisons de sécurité.

En ambiances chaudes et très chaudes, excepté en présence d'un rayonnement élevé asymétrique, les températures cutanées locales ont tendance à être homogènes, de sorte que des schémas de pondération à peu de points de mesurage peuvent être utilisés avec précision.

6 Évaluation de l'astreinte thermique à partir de la fréquence cardiaque (HR)

6.1 Généralités

La fréquence cardiaque (battements·min^{-1}) sur un intervalle de temps t (min) est définie par HR $\boxed{n}$/t, où n est le nombre de battements cardiaques observés durant cet intervalle de temps. Elle est exprimée en battements par minute (battements·min^{-1}). Cette valeur est en général comptée pour des intervalles de 1 min.

À tout instant, la fréquence cardiaque, HR, peut être considérée comme étant la somme de plusieurs composantes qui ne sont pas indépendantes les unes des autres:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_\varepsilon$$

Dans le contexte de la présente Norme internationale, seule la composante thermique, ΔHR_T est examinée.

6.2 Principe de la méthode

En situation de travail réelle, la composante ΔHR_T ne peut être évaluée qu'au cours d'un pause dans le travail, si la fréquence cardiaque de repos, HR_0, a été mesurée avant et si les composantes dues aux efforts statiques et au travail musculaire dynamique peuvent être négligées.

Lors de l'arrêt du travail musculaire, la fréquence cardiaque commence à diminuer rapidement. Cette courbe de décroissance de HR en fonction des valeurs de repos présente donc une discontinuité après un certain temps de récupération et la composante au moment de la mesure, c'est-à-dire la fin de la période de travail, peut être estimée par

$$\Delta HR_T = HR_r - HR_0$$

Le temps de récupération de HR eu égard aux composantes dues aux efforts statiques et au travail musculaire dynamique est supposé de 4 min; il peut être plus long si le métabolisme de travail était très élevé. Aussi peut-il être nécessaire de mesurer la fréquence cardiaque de manière continue au cours des premières minutes de récupération.

6.3 Interprétation

L'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique ΔHR_T est fortement corrélée à l'élévation de t_{cr}. L'élévation de HR par élévation de 1°C dans t_{cr} est appelée réactivité cardiaque thermique et est exprimée en battements cardiaques par minute par degré Celsius (battements·min^{-1}·$°C^{-1}$). Les variations interindividuelles de la réactivité thermique peuvent être considérables. De plus, pour un même sujet, la réactivité thermique varie selon le type d'effort fourni (et donc le groupe musculaire concerné) et selon que la contrainte thermique est essentiellement exogène (due au climat) ou endogène (due au métabolisme). Son interprétation doit tenir compte de ces facteurs.

La taille de la composante thermique, ΔHR_T, est un indicateur direct pour la composante thermique de l'astreinte expérimentée à ce moment précis.

7 Évaluation de l'astreinte physiologique à partir de la perte de la masse corporelle due à la sudation (Δmsw)

7.1 Principe de la méthode

La perte brute de masse corporelle (Δm_g) d'une personne au cours d'un intervalle de temps donné est la différence entre les masses corporelles mesurées au début et à la fin de cet intervalle.

Δm_g est la somme de plusieurs composantes:

$$\Delta m_g = \Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_o + \Delta m_{wat} + \Delta m_{sol} + \Delta m_{clo}$$

Dans le contexte de la présente Norme internationale, la perte par transpiration (Δm_{sw}) et le bilan net en eau du corps sont considérés.

7.2 Interprétation

Dans un environnement chaud, la perte par transpiration peut être considérée comme étant un indice de l'astreinte physiologique d'origine thermique incluant non seulement la transpiration qui s'évapore à la surface de la peau mais également la fraction s'écoulant de la surface du corps ou s'accumulant dans le vêtement.

Le bilan net en eau ($\Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_{wat}$) est à considérer en rapport avec le risque de déshydratation du corps. La prise régulière de petites quantités d'eau, durant toute la période d'exposition, permet d'équilibrer environ 75 % de la perte en eau corporelle: ceci peut être supposé le cas pour le sujet acclimaté. Dans le cas de sujet non acclimaté, en revanche, la périodicité, le volume et la qualité de la prise en eau pourraient ne pas être adéquats et il est conseillé de considérer que la perte en eau ne sera pas compensée du tout.

Dans les conditions confortables ou plus froides, la perte par transpiration et le bilan thermique en eau du corps sont réduits et ont peu d'intérêt. Δm_{sw} peut cependant être comparée à la valeur prévisible en fonction du métabolisme énergétique pour estimer le degré de confort de la situation de travail.

Annexe A : Comparaison des méthodes physiologiques d'évaluation de l'astreinte thermique

A.1 Généralités

Le Tableau A.1 décrit les exigences techniques des différentes méthodes de mesurage de l'astreinte thermique. Les critères de comparaison sont les suivants.

A.2 Complexité de l'appareillage

0 simple
1 devrait répondre à certaines exigences
2 complexe

A.3 Exigences techniques lors du mesurage

0 technique simple
1 requiert un personnel compétent
2 requiert une surveillance médicale

A.4 Continuité du mesurage

C mesurage continu
D mesurage discontinu

A.5 Interférence avec le travail

0 limitée au temps de mesurage
1 interférence modérée avec le travail
2 interférence importante avec le processus normal de travail

A.6 Gêne pour la personne

0 gêne très légère et limitée aux périodes de mesurage
1 gêne réduite sauf si technique non optimale
2 gêne d'origine psychologique sans gêne physique
3 gêne physique modérée

A.7 Risques pour la santé de la personne

0 aucun risque
1 risque potentiel si technique non optimale
2 risque potentiel si anomalie anatomique du porteur

A.8 Coût de l'appareillage

0 très faible
1 modéré
2 moyen à élevé suivant le système utilisé
3 élevé

Tableau A.1 — Comparaison des méthodes physiologiques d'évaluation de l'astreinte thermique

	1 Complexité de l'appareillage	2 Exigence technique	3 Continuité de mesurage	4 Interférence avec le travail	5 Gêne	6 Risque pour la santé	7 Coût
t_{es}	2	2	C	1	3	2	1
t_{re}	1	0	C	0	2	1	1
t_{ab}	2	1	C	0	2	2	3
t_{ty} (capteur)	2	2	C	1	3	2	1
t_{ty} (dispositif IR)	1	1[d]	D	0	1	1	1
t_{ac}	1	1	C	1	3	1	1
t_{ur}	1	0	D	0	2	0	0
HR: pouls[a] fréquence[b] ECG[c]	0 1 2	0 0 1	D C C	0 0 1	0 0 1	0 0 0	0 1 2
t_{sk} contact sans contact	1 2	1 1	C D	1 0	1 0	0 0	2 3
Perte de sueur	1	0	D	1	1	0	1

[a] Il s'agit de la mesure de la fréquence cardiaque au pouls du sujet.
[b] Il s'agit de la mesure de la fréquence cardiaque à partir d'une analyse linéaire du signal électrocardiographique.
[c] Il s'agit de l'enregistrement continu du signal électrocardiographique.
[d] D'autres exigences doivent être établies pour obtenir des valeurs précises.

Le Tableau A.2 compare les différentes méthodes en ce qui concerne leur pertinence et leur difficulté d'interprétation pour l'évaluation de l'astreinte thermique selon les critères suivants:

A.9 Pertinence dans les trois domaines: ambiances froides, modérées et chaudes

- − non pertinente pour l'évaluation de l'astreinte thermique
- + pertinente

A.10 Exigences concernant l'interprétation des données

- 0 interprétation directe
- 1 interprétation requérant des connaissances élémentaires
- 2 interprétation requérant des compétences particulières

Tableau A.2 — Pertinence et difficulté d'interprétation des différents paramètres physiologiques dans différentes conditions climatiques (les limites entre les conditions sont déterminées par le climat, les vêtements et le métabolisme énergétique)

	Pertinence			Interprétation
	Froid	Modéré	Chaud	
t_{cr}	□	□	□	Voir ci-dessous
t_{es}	□	–	□	1
t_{re}	–	□	□	0
t_{ab}	□	–	□	1
t_{ty} (capteur)	–	□	□	1
t_{ty} (dispositif IR)	–	□	□	1
t_{ac}	–	□	□	1
t_{ur}	–	□	□	0
HR	–	–	□	2
t_{sk}	□	□	□	2
Perte de sueur	–	□	□	1

Annexe B : Techniques de mesures

B.1 Mesure de la température corporelle centrale

B.1.1 Introduction

Le mesurage de quelque température que ce soit doit être effectué au moyen d'un capteur thermique (généralement un thermomètre à mercure, un thermomètre à résistance, un thermocouple ou une thermistance) permettant une précision de 0,1 °C dans la gamme de 33 °C à 43 °C.

Il convient que le capteur soit de faible capacité thermique (cette exigence est moins sévère dans le cas de la température rectale). Il y a lieu que son temps de réponse, à 90 % de la valeur, soit le plus faible possible et inférieur à 0,5 min. Il convient d'utiliser un capteur de très faible constante de temps, notamment pour la température urinaire.

Des exigences particulières sont à respecter concernant l'hygiène de la sonde et du capteur. Ces derniers sont généralement soigneusement nettoyés et débarrassés de toute matière organique, avant d'être désinfectés au moyen d'agents tels que l'eau oxygénée, l'isopropanol ou l'éthanol. Pour les sondes invasives (rectales, par exemple), il convient d'utiliser des sondes à usage unique ou d'appliquer un nettoyage supplémentaire avec des agents antiviraux. Il y a lieu de soigneusement rincer la sonde avec de l'eau claire ou une solution saline normale stérile pour éviter toute rétention de l'agent désinfectant qui serait susceptible d'induire des réactions d'irritation ou d'allergie chez le porteur suivant.

Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser des capteurs à usage unique recouverts de protections renouvelables.

Il est recommandé que tous les composants électriques utilisés répondent aux normes relatives au matériel biomédical, notamment en ce qui concerne l'isolement électrique et les courants de fuite.

B.1.2 Température œsophagienne (tes)

Quelle que soit la technique utilisée, le mesurage de la température œsophagienne est inconfortable et il convient d'en avertir le porteur.

Il est recommandé d'introduire la sonde par les fosses nasales plutôt que par la bouche. L'extrémité de la sonde peut être enduite d'un gel analgésique de façon à réduire l'inconfort lors du passage dans les fosses nasales.

La technique la plus simple de positionnement de la sonde consiste à introduire le cathéter dans les fosses nasales jusqu'à un point repère prédéterminé. Il convient d'introduire la sonde horizontalement le long de la base du nez (c'est-à-dire sous le cornet inférieur), cette voie entraînant un passage direct vers le pharynx.

La longueur du cathéter jusqu'à ce point repère est généralement de l'ordre de 25 % de la taille du sujet, la raideur et la forme du capteur étant choisies de manière à éviter de blesser les conduits empruntés. Il convient de limiter le diamètre du cathéter à 1,5 mm. Des cathéters trop souples peuvent donner lieu à la formation de boucles, faisant que le capteur soit localisé plus haut que désiré dans l'œsophage et que son extraction soit douloureuse, voire dangereuse.

La position correcte de la sonde peut être contrôlée en doublant le capteur de température par une électrode permettant d'enregistrer les modifications du complexe ECG œsophagien en fonction de la profondeur d'introduction. Le critère de positionnement est le caractère biphasique de l'onde auriculaire P.

Pour des raisons d'éthique médicale, le contrôle de la position de la sonde ne peut pas être effectué par radioscopie.

B.1.3 Température rectale (tre)

Il convient d'introduire le capteur de température à 100 mm (100 mm à 150 mm) au minimum au-delà de la marge de l'anus. De faibles différences de température peuvent être enregistrées selon la profondeur d'introduction du capteur; aussi celle-ci doit-elle être maintenue constante tout au long de la période de mesurage.

Il convient d'éviter le mesurage de la température rectale chez les personnes souffrant de lésions locales. Un thermomètre en verre ne peut être utilisé que lorsque le sujet demeure au repos et en position couchée.

La largeur d'insertion type est moindre pour les sondes en verre, comparées aux sondes flexibles, incassables.

B.1.4 Température intra-abdominale (tab)

Le capteur de température est constitué par un émetteur FM miniaturisé dont la fréquence des impulsions émises est modulée par une thermistance; l'ensemble du circuit est encapsulé et constitue une radio-pile qui peut être ingérée sans difficulté majeure. Le signal est recueilli par télémétrie au moyen d'une antenne omnidirectionnelle portée à la ceinture.

Avant son ingestion, il convient d'étalonner la radio-pile dans un bain-marie porté à 37,0 °C.

Le contrôle de la position de la sonde après ingestion ne doit pas être effectué par radioscopie. Lorsque la radio-pile n'est pas récupérée par le porteur dans les 72 h suivant l'ingestion, il y a lieu de s'assurer de sa présence ou de son absence dans l'abdomen par contrôle de l'émission radio.

B.1.5 Température buccale (tor)

Il convient de placer le capteur sous la langue, latéralement et à proximité de la base de la langue. Il est recommandé de maintenir la bouche fermée pendant la durée du mesurage. Il y a lieu que le capteur soit de petites dimensions, plat et de faible capacité thermique. Il convient que la sonde soit suffisamment souple pour permettre de garder la bouche fermée sans inconfort.

La température mesurée ne peut être considérée comme une approximation satisfaisante de la température corporelle centrale que si les conditions suivantes sont remplies:

- température ambiante est supérieure à 18 °C;
- durée de fermeture de la bouche avant le relevé:
- ambiances fraîches (température de l'air de 18 °C à 30 °C): 8 min minimum;
- ambiances chaudes (température de l'air supérieure à 30 °C): 5 min minimum;
- ne pas boire, ni manger, ni fumer dans les 15 min précédant le placement du capteur.

B.1.6 Température tympanique (tty)

Préalablement au mesurage, il convient de pratiquer un examen otoscopique pour s'assurer de l'intégrité du tympan et des parois du conduit auditif. Celui-ci est débarrassé des dépôts éventuels de cérumen.

La température tympanique peut être mesurée à l'aide d'une thermistance ou d'un thermocouple.

Le contact du capteur avec le tympan est facilement identifié par la sensation douloureuse qu'il induit chez le sujet. La forme du capteur et la raideur de la sonde sont des facteurs critiques pour ne pas entraîner de lésions de la membrane tympanique. Il convient que le capteur soit de capacité thermique faible de manière à perturber le moins possible l'équilibre thermique au niveau du tympan.

La température tympanique ne constitue une évaluation acceptable de la température corporelle centrale que si les conditions suivantes sont respectées:

- maintien de la position initiale du capteur pendant toute la durée du mesurage;
- isolation thermique du méat auriculaire et du pavillon de l'oreille par rapport au milieu ambiant;
- conditions ambiantes au niveau de la tête du sujet: température d'air comprise entre 18 °C et 58 °C,

vitesse d'air inférieure à 1 m/s et température moyenne de rayonnement proche de la température de l'air.

Lorsque les conditions de travail impliquent soit un rayonnement thermique direct sur la tête, soit une convection importante (vitesse de l'air supérieure à 1 m/s), une mesure fiable ne peut être obtenue que si le sujet porte, en plus du dispositif isolant l'oreille, un casque enveloppant une large portion de la surface de la tête, à l'exception du visage.

La température tympanique peut également être mesurée à l'aide d'un thermomètre à rayonnement infrarouge sans contact. Pour l'application de cet appareil, il convient, outre les conditions énoncées ci-dessus, de s'assurer que le dispositif ne mesure que la température de la membrane tympanique et non celle des parois du méat auriculaire. Les facteurs de complication qui rendent cette entreprise difficile sont les suivants:

- angle de l'optique du capteur trop important;
- absence de contrôle sur les foyers du capteur;
- méat auriculaire étroit et/ou courbé;
- présence de poils dans le conduit auditif;
- présence de cérumen;
- difficulté à isoler le conduit auditif.

Pour ces raisons, les valeurs enregistrées à l'aide des dispositifs à rayonnement infrarouge utilisés de manière discontinue sont souvent non valides. Si elles sont utilisées, il convient que les conditions environnementales au niveau de la tête du sujet ne soient pas en dehors de la gamme de température de l'air située entre 18 °C et 30 °C, avec une vitesse de l'air inférieure à 0,2 m/s et une température moyenne de rayonnement proche de la température de l'air.

B.1.7 Température du conduit auditif (tac)

Étant donné le risque de douleur et le danger associé au mesurage de la température tympanique, la préférence est donnée au mesurage dans le méat auriculaire. La procédure de mise en place du capteur est similaire à celle utilisée pour t_{ty}, cependant, dès que le contact avec le tympan est établi, le capteur est retiré de quelques mm (sans que ce retrait ne dépasse 10 mm). Une alternative consiste à monter le capteur dans un bouchon d'oreille de sorte que, lorsque le bouchon est inséré dans le méat, le capteur se positionne à moins de 10 mm du tympan.

Les conditions d'application sont identiques à celles présentées pour la température tympanique sauf en ce qui concerne la différence maximale entre la température de l'air et t_{ac} qui doit être de 10 °C.

Leur respect strict n'assure cependant qu'une approximation de la température corporelle centrale. Lorsque ces conditions ne peuvent être réunies, il convient de mesurer t_{cr} à un autre site (t_{re} ou t_{es}).

B.1.8 Température urinaire (tur)

Il convient de la mesurer à l'aide d'un dispositif de recueil de l'urine isolé thermiquement et d'un capteur à temps de réponse court. Il convient d'enregistrer la température pendant et directement dans le jet urinaire et non dans l'urine collectée. Dans l'état actuel des connaissances, il est recommandé d'effectuer le mesurage dans un environnement où la température de l'air est comprise entre 15 °C et 25 °C.

B.2 Mesurage des températures cutanées

Il est préférable d'utiliser des sondes de rayonnement infrarouge sans contact pour mesurer la température cutanée chaque fois que cela est techniquement possible. Cela exige cependant que le sujet soit nu.

Quelle que soit la technique utilisée, il convient d'effectuer le mesurage au moyen de capteurs ayant une

précision de ± 0,1 °C dans la gamme de 25 °C à 40 °C. Il est recommandé d'étendre cette gamme jusqu'à 0 °C pour le mesurage des températures cutanées, dans des conditions froides, par exemple par contact avec des surfaces froides. Il convient que le capteur soit de faible capacité thermique et que son temps de réponse à 90 % soit le plus faible possible et inférieur à 0,5 min.

Dans le cas de mesurage par contact et afin de réduire au minimum l'influence du climat extérieur, il convient que le capteur soit plat et asymétrique, la surface non en contact étant isolée thermiquement. Afin d'éviter les effets locaux, le capteur peut être fixé à la peau au moyen d'une bande autocollante conductrice de la chaleur. Il convient cependant d'éviter ou de limiter au strict nécessaire (dans ce cas des corrections adéquates doivent être appliquées) l'utilisation de systèmes de fixation susceptibles de modifier les échanges par convection, rayonnement et évaporation.

Pour l'estimation de la température cutanée moyenne à partir des températures locales mesurées en divers points, de très nombreux schémas de pondération ont été proposés, utilisant un nombre de points de mesurage variant entre 1 et 14 points. Afin de rendre le mesurage plus systématique et les résultats plus comparables, trois schémas de pondération, comprenant 4, 8 ou 14 points de mesurage, sont préconisés. Le Tableau B.1 situe les 14 points de mesurage de température locale. D'autres méthodes de calcul existent, utilisant d'autres points et en nombre différent.

t_{sk} est calculée en affectant à chaque point de mesurage de température locale un coefficient de pondération correspondant à la surface relative de la région corporelle représentée: le Tableau B.1 donne les coefficients de pondération à utiliser suivant les trois schémas.

En ambiances proches de la neutralité thermique et en ambiances froides, les schémas de pondération à 8 ou 14 points sont à recommander et des points supplémentaires éventuellement ajoutés (doigts, orteils, etc.).

En ambiances chaudes ou très chaudes, le schéma de pondération à 4 points peut être choisi, excepté en présence d'un rayonnement élevé asymétrique.

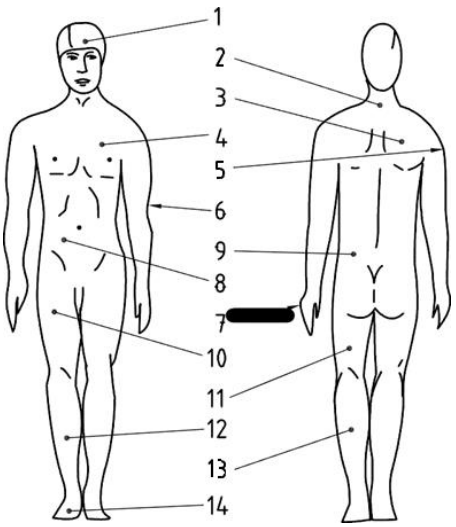
La température cutanée, t_{sk}, est obtenue par la formule suivante:

$$t_{sk} = \Sigma\, k_i\, t_{ski}$$

Tableau B.1 — Points de mesurage et coefficients de pondération

	Points de mesurage	4 points	8 points	14 points
1	front		0,07	1/14
2	nuque	0,28		1/14
3	omoplate droite	0,28	0,175	1/14
4	thorax supérieur gauche		0,175	1/14
5	bras droit en position haute		0,07	1/14
6	bras gauche en position basse		0,07	1/14
7	main gauche	0.16	0,05	1/14
8	abdomen droit			1/14
9	zone paravertébrale (rein) gauche			1/14
10	cuisse antérieure droite		0,19	1/14
11	cuisse postérieure gauche			1/14
12	tibia avant droit	0,28		1/14
13	mollet gauche		0,2	1/14
14	cou-de-pied droit			1/14

Figure B.1 — Position des points de mesurages, listés dans le Tableau B.2



B.3 Mesurage de la fréquence cardiaque (HR)

La méthode la plus simple consiste à chronométrer un nombre prédéterminé de battements cardiaques au niveau de l'artère radiale ou de la carotide. Ces techniques de comptage manuel nécessitent l'immobilisation de la personne et ne procurent qu'une valeur discrète de la fréquence cardiaque.

Le comptage peut être effectué de manière continue par pléthysmographie au niveau d'un doigt ou du lobe auriculaire. La gêne et les erreurs entraînées par ces techniques sont cependant susceptibles d'être excessives de sorte que l'on a de préférence recours à la technique d'enregistrement de VECG.

Le signal électrique recueilli au moyen d'électrodes fixes sur le thorax du sujet est soit transmis par télémétrie, soit enregistré directement au moyen d'un enregistreur miniature analogique ou digital, porté par le sujet.

B.4 Mesurage de la perte de masse **corporelle (Δm)**

Il convient que la précision de la balance utilisée pour le mesurage de la perte de masse corporelle soit meilleure que 50 g. Il est recommandé d'utiliser une balance plus précise pour la mesure des ingestions et des excrétions: gamme souhaitable 0 kg à 5 kg, avec une précision de ±20 g.

Idéalement, il convient que le sujet soit pesé nu, de manière à éviter de prendre en compte la composante Δm_{clo} due aux variations d'habillement et à l'accumulation de sueur dans le vêtement.

La perte de masse due à l'évaporation au niveau respiratoire Δm_{res} est donnée par la formule

$$\Delta m_{res} = 0{,}000\,75\ A_{Du} \cdot M\ (5{,}624 - p_a)\ \Delta t$$

où Δm_{res} est exprimée en grammes.

La perte de masse due à la différence des masses de dioxyde de carbone et l'oxygène (Δm_0) est donnée par la formule

$$\Delta m_0 = 0{,}01\ A_{Du} \cdot M\ (R - 0{,}73)\ \Delta t$$

où Δm_0 est exprimée en grammes.

Annexe C : Valeurs limites des paramètres physiologiques d'astreinte thermique

C.1 Introduction

Les valeurs limites ci-dessous recommandées ont été établies en fonction du risque pour la santé encouru par un sujet adulte physiquement apte et en bon état de santé et de la pertinence des différentes techniques à déceler ce risque. Les critères de performance ou de dextérité n'ont donc pas été pris en compte.

Sauf spécification contraire, ces valeurs limites sous surveillance physiologique sont conformes à celles adoptées dans l'ISO 7933. Elles font référence à des expositions sur les lieux de travail, et non pas cliniques ou de laboratoire, où des limites plus larges peuvent être acceptées.

C.2 Température corporelle centrale

Il convient que la température corporelle centrale ne s'écarte pas des limites données ci-dessous.

C.2.1 En ambiance chaude

Les valeurs limites dépendent de la vitesse d'accroissement de la température corporelle centrale et des types de mesurage physiologique realisés.

En cas d'accumulation de chaleur lente (c'est-à-dire augmentation de 1 °C en plus d'une heure), la limite peut être établie à une augmentation de 1 °C ou à 38 °C dans les cas suivants:

a) si t_{cr} est mesurée de manière intermittente quelle que soit la technique utilisée;
b) lors de mesurage de la température du conduit auditif ou de la température tympanique, du fait que la position correcte constante du capteur est incertaine;
c) en l'absence d'un personnel médical compétent;
d) quand aucun autre paramètre physiologique n'est mesuré.

En cas d'accumulation de chaleur rapide (augmentation d'environ 1 °C en moins d'une heure), les mêmes limites sont applicables dans les mêmes conditions, de même que lorsque la température rectale ou la température intra-abdominale est mesurée, du fait que ces dernières s'élèvent à un rythme moins élevé que la température des centres de thermorégulation.

Dans les autres conditions et en particulier quand la température œsophagienne est mesurée de manière continue en même temps que la fréquence cardiaque est enregistrée, des limites supérieures peuvent être tolérées, telles qu'une augmentation de 1,4 °C ou une température de 38,5 °C.

Une augmentation de température au-delà de 38,5°C peut être tolérée pour autant que les conditions suivantes soient observées:

1. les sujets ont été sélectionnés médicalement;
2. ils sont acclimatés à la chaleur du fait d'expositions répétées à l'environnement et à la tâche particulière;
3. une surveillance médicale continue est assurée et les moyens de secours sont à disposition immédiate;
4. la température œsophagienne est contrôlée en continu;
5. d'autres paramètres physiologiques, notamment la fréquence cardiaque, sont surveillés simultanément;
6. l'exposition peut toujours être interrompue dès que des symptômes d'intolérance, tels que sensation d'épuisement ou d'étourdissement, ou nausée apparaissent;
7. le travailleur est autorisé à quitter la situation de travail à son gré.

Aucune élévation de la température corporelle centrale au-dessus de 39 °C n'est cependant recommandée.

C.2.2 En ambiance froide

Seules t_{es}, t_{re} et t_{ab} sont pertinentes.

Il convient de fixer la limite inférieure de ces températures à 36,0 °C dans les cas suivants:

a) lorsque ces températures sont mesurées de manière intermittente;
b) lorsque l'exposition est susceptible d'être répétée le même jour.

Dans des circonstances exceptionnelles, des températures plus basses peuvent être tolérées durant de courtes périodes de temps pour autant que

1) les sujets aient été sélectionnés médicalement,
2) des températures cutanées locales soient mesurées simultanément et les limites s'y rapportant soient respectées (voir C.3),
3) le travailleur soit autorisé à quitter la situation de travail à son gré.

C.3 Valeurs limites des températures cutanées

Pour les raisons exposées précédemment, les limites mentionnées ci-dessous concernent uniquement le seuil de douleur.

Selon ces critères, la température cutanée locale maximale, en ambiance chaude, est égale à 43 °C.

En ambiance froide, elle est de 15 °C pour la température cutanée minimale (en particulier pour les extrémités du corps: visage, doigts et orteils).

C.4 Fréquence cardiaque

L'élévation de la fréquence cardiaque due à l'astreinte thermique ΔHRT est en moyenne de 33 battements min^{-1} par degré d'élévation de la température des parties profondes du corps.

Cependant, cette réactivité cardiaque thermique varie considérablement d'un individu à l'autre. Dès lors, lorsque la fréquence cardiaque est le seul paramètre physiologique mesuré, il est raisonnable d'établir la valeur limite supérieure de la composante ΔHR_T à quelque 33 battements·min^{-1}.

Dans des situations où l'astreinte thermique est susceptible d'être plus élevée (comme décrit dans l'ISO 7933), la mesure concomitante de la température t_{cr} est nécessaire. De plus, il convient que le système utilisé permette la surveillance de la fréquence cardiaque en temps réel durant l'exposition.

Il est recommandé que la valeur de HR, au poste de travail, ne dépasse pas la valeur limite de la personne réduite d'environ 20 battements·min^{-1}. Il convient de déterminer cette valeur au moyen d'un test individuel. Si ceci n'est pas possible, elle peut être prédite par l'expression suivante:

$$HR_L = 185 - 0{,}65\ \text{âge}$$

Il faut cependant rappeler que la valeur individuelle peut s'écarter de plus de 20 battements·min^{-1} de cette valeur moyenne et que, par conséquent, l'utilisation de cette valeur peut présenter un risque significatif pour certains sujets.

Il convient que la fréquence cardiaque soutenue après une période de travail n'excède pas la valeur suivante:

$$HR_{Lsoutenue} = 180 - \text{âge}$$

Selon la valeur limite maximale de 39 °C établie pour la température corporelle centrale, la limite maximale pour l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique peut être établie à 60 battements·min^{-1}. Ceci est applicable dans les mêmes conditions et en particulier lorsqu'une surveillance médicale continue est assurée.

C.5 Perte de masse corporelle

Conformément à l'ISO 7933, il convient de limiter le débit sudoral à 1,0 l/h pour les sujets non acclimatés et à 1,25 l/h pour les sujets acclimatés.

Concernant le bilan total hydrique ($\Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_{wat}$), il convient d'en fixer la limite à 5 % de la masse corporelle afin d'éviter la déshydratation.

Bibliographie

[1] ISO 7243, Ambiances chaudes — Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir)

[2] ISO 7726, Ergonomie des ambiances thermiques — Appareils de mesure des grandeurs physiques

[3] ISO 7730, Ambiances thermiques modérées — Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique

[4] ISO 8996, Ergonomie — Détermination de la production de chaleur métabolique

[5] ISO 9920, Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire

[6] ISO/TR 11079, Évaluation des ambiances froides — Détermination de l'isolement requis des vêtements

[7] ISO 11399, Ergonomie des ambiances thermiques — Principes et application des Normes internationales pertinentes

[8] ISO 12894, Ergonomie des ambiances thermiques — Surveillance médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes

[9] ISO 13731, Ergonomie des ambiances thermiques — Vocabulaire et symboles