

NORME
INTERNATIONALE

ISO
7933

Première édition
1989-07-15

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

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)

*Hot environments — Analytical determination and interpretation of thermal stress
using calculation of required sweat rate*

ISO 7933:1989

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e9fe-254c-4c04-b0ee-bcc09d57634c/iso-7933-1989>



Numéro de référence
ISO 7933 : 1989 (F)

Sommaire

	Page
Avant-propos	iii
Introduction	iv
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Principes de la méthode d'évaluation	1
4 Principales étapes de calcul	2
5 Interprétation du débit sudoral requis	3
Annexes	
A Données complémentaires, nécessaires au calcul du bilan thermique	5
B Estimation des isolements thermiques d'ensembles vestimentaires	7
C Critères et valeurs limites de contrainte et d'astreinte thermiques	9
D Programme informatique permettant le calcul de la sudation requise et de la durée limite d'exposition à une ambiance thermique quelconque	11

iteh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 7933:1989

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e97e-254c-4c04-b0ee->

[bcc09d57634c/iso-7933-1989](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e97e-254c-4c04-b0ee-bcc09d57634c/iso-7933-1989)

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 7933 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 159, *Ergonomie*.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e9fe-254c-4c04-b0ee-bcc09d57634c/iso-7933-1989>

Les annexes A, B, C et D de la présente Norme internationale sont données uniquement à titre d'information.

Introduction

La présente Norme internationale fait partie d'une série de normes consacrées à l'estimation de la contrainte thermique en ambiance chaude.

La méthode d'estimation analytique et d'interprétation de la contrainte thermique permet de prédire les effets physiologiques du travail à la chaleur et de définir de façon rationnelle les mesures à prendre pour en prévenir ou limiter les effets. Cette méthode est recommandée soit directement pour effectuer une analyse approfondie des conditions de travail à la chaleur, soit en complément de la méthode basée sur l'indice WBGT (voir l'ISO 7243) lorsque les valeurs repères fixées pour cet indice sont dépassées.

Dans des circonstances de contrainte très élevée, détectées telles par la méthode décrite dans la présente Norme internationale, une surveillance directe et individuelle des travailleurs exposés est nécessaire: les mesures physiologiques susceptibles d'être utilisées seront décrites dans une future norme.

[ISO 7933:1989](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e9fe-254c-4c04-b0ee-bcc09d57634c/iso-7933-1989)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5e08e9fe-254c-4c04-b0ee-bcc09d57634c/iso-7933-1989>

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

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie une méthode d'évaluation analytique et d'interprétation de la contrainte thermique subie par un sujet en ambiance thermique chaude. Elle décrit les modes de calcul du bilan thermique ainsi que du débit de sueur que l'organisme humain doit mettre en œuvre pour assurer l'équilibre de ce bilan: ce débit de sueur est appelé «sudation requise».

Les divers termes intervenant dans la détermination de la sudation requise permettent de déterminer les parts respectives prises par les divers paramètres physiques de l'environnement dans la contrainte thermique subie par le sujet. La présente Norme internationale permet de cette manière de déterminer sur quel paramètre ou ensemble de paramètres il convient d'agir, et dans quelle mesure, afin de réduire le risque d'astreintes physiologiques.

Les objectifs principaux de la présente Norme internationale sont

- l'évaluation de la contrainte thermique dans les ambiances susceptibles d'entraîner des accroissements de température centrale du corps ou des pertes hydriques importantes chez un sujet standard;
- la recherche des modifications à apporter à la situation de travail pour réduire ou éliminer ces effets;
- la détermination des durées limites d'exposition à pratiquer de manière à limiter l'astreinte physiologique à une valeur jugée tolérable.

La présente Norme internationale ne vise pas à prédire le comportement physiologique d'un sujet donné, mais concerne un sujet standard en bonne santé et apte à son travail.

Cette méthode de calcul et d'interprétation du bilan thermique est basée sur les apports scientifiques les plus récents. Les améliorations futures apportées aux expressions de calcul des différents termes du bilan ainsi qu'à son interprétation devront être prises en compte au fur et à mesure de leur acquisition. Dans sa forme actuelle, elle ne peut être utilisée dans le cas du port de vêtements spéciaux de protection.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au

moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 7243 : 1989, *Ambiances chaudes — Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir)*.

ISO 7726 : 1985, *Ambiances thermiques — Appareils et méthodes de mesure de grandeurs physiques*.

3 Principes de la méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation et d'interprétation dresse le bilan thermique du corps à partir

- des paramètres physiques de l'ambiance thermique:
 - la température d'air, t_a (en degrés Celsius);
 - la température moyenne de rayonnement, \bar{t}_r (en degrés Celsius);
 - la pression partielle de vapeur d'eau, p_a (en kilopascals);
 - la vitesse de l'air, v_a (en mètres par seconde).

(Ces paramètres doivent être mesurés, conformément aux spécifications de l'ISO 7726.)

- des paramètres moyens caractérisant les travailleurs exposés à cette situation de travail :
 - la puissance métabolique de travail, M (en watts par mètre carré);
 - l'isolement thermique du vêtement, I_{cl} (en mètres carrés kelvins par watt).

L'article 4 de la présente Norme internationale décrit les principes de calcul des différents échanges de chaleur intervenant dans le bilan thermique, ainsi que du débit sudoral nécessaire à l'équilibre du corps. L'annexe A propose les expressions mathématiques nécessaires à ce calcul.

L'article 5 décrit la méthode d'interprétation des résultats et conduit à la détermination du débit sudoral prédit, des durées limites d'exposition et des alternances travail-repos à pratiquer. Cette détermination est menée sur la base de deux critères : élévation de température corporelle et perte hydrique maximales admissibles. L'annexe C propose des valeurs limites pour ces critères.

La précision avec laquelle sont évalués le débit sudoral prédit et les durées limites d'exposition est fonction du modèle retenu (c'est-à-dire des expressions proposées dans l'annexe A) et des valeurs limites adoptées. Elle dépend également de la précision de mesure des paramètres physiques, ainsi que de la précision d'évaluation du métabolisme et de l'isolement thermique du vêtement.

4 Principales étapes de calcul

4.1 Équation générale du bilan thermique

L'équation du bilan thermique du corps peut s'écrire

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + S \quad \dots(1)$$

Cette équation exprime que la production de chaleur interne du corps, qui correspond à la puissance métabolique (M), moins la puissance mécanique utile (W), est compensée par les échanges de chaleur au niveau des voies respiratoires par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}), ainsi que par les échanges de chaleur au niveau de la peau par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation (E), le solde éventuel, appelé stockage de chaleur (S), s'accumulant dans le corps. Les différents termes de cette équation sont successivement passés en revue avec les principes de calcul (des expressions détaillées sont présentées en annexe A).

4.1.1 Puissance métabolique (M , en watts par mètre carré)

M est la puissance métabolique. Son évaluation ou sa mesure sera précisée dans une future Norme internationale.

4.1.2 Puissance mécanique utile (W , en watts par mètre carré)

W est la puissance mécanique utile. Dans la plupart des situations industrielles, celle-ci est faible et peut être négligée.

4.1.3 Échange de chaleur par convection respiratoire (C_{res} , en watts par mètre carré)

Le débit de chaleur par convection respiratoire peut être exprimé par la relation de principe

$$C_{res} = c_p \dot{V} (t_{ex} - t_a) / A_{Du} \quad \dots(2)$$

où

c_p est la chaleur spécifique de l'air sec à pression constante, en joules par kilogramme d'air sec;

\dot{V} est le débit ventilatoire, en kilogrammes d'air par seconde;

t_{ex} est la température de l'air expiré, en degrés Celsius;

t_a est la température de l'air, en degrés Celsius;

A_{Du} est la surface corporelle, en mètres carrés.

4.1.4 Échange de chaleur par évaporation respiratoire (E_{res} , en watts par mètre carré)

Le débit de chaleur par évaporation respiratoire peut être exprimé par la relation de principe

$$E_{res} = c_e \dot{V} (W_{ex} - W_a) / A_{Du} \quad \dots(3)$$

où

c_e est la chaleur d'évaporation de l'eau, en joules par kilogramme;

W_{ex} est le rapport d'humidité de l'air expiré, en kilogrammes d'eau par kilogramme d'air sec;

W_a est le rapport d'humidité de l'air inspiré, en kilogrammes d'eau par kilogramme d'air sec;

\dot{V} et A_{Du} sont tels que définis dans l'équation (2).

4.1.5 Échange de chaleur par conduction (K , en watts par mètre carré)

En pratique, le débit de chaleur par conduction thermique à travers des surfaces du corps en contact avec des éléments solides peut être assimilé quantitativement aux débits de chaleur par convection et rayonnement qui se feraient si ces surfaces n'étaient pas en contact avec ces solides. De ce fait, le débit de chaleur par conduction n'est pas directement pris en compte.

4.1.6 Échange de chaleur par convection au niveau de la peau (C , en watts par mètre carré)

Le débit de chaleur par convection peut être exprimé par l'équation

$$C = h_c \cdot F_{cl} (\bar{t}_{sk} - t_a) \quad \dots(4)$$

où

h_c est le coefficient d'échange de chaleur par convection, en watts par mètre carré kelvin;

F_{cl} est le facteur de réduction des échanges de chaleur par les vêtements (sans dimension);

\bar{t}_{sk} est la température cutanée moyenne, en degrés Celsius;

t_a est tel que défini dans l'équation (2).

4.1.7 Échange de chaleur par rayonnement au niveau de la peau (R , en watts par mètre carré)

Le débit de chaleur par rayonnement est fonction des caractéristiques de la peau, des vêtements, de la posture, de la température de la peau (\bar{t}_{sk}) et de la température moyenne de rayonnement de l'ambiance (\bar{t}_r).

Ce débit peut être exprimé par l'équation

$$R = h_r F_{cl} (\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r) \quad \dots(5)$$

où

h_r est le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement, en watts par mètre carré kelvin;

F_{cl} et \bar{t}_{sk} sont tels que définis dans l'équation (4);

\bar{t}_r est la température moyenne de rayonnement ambiant, en degrés Celsius.

4.1.8 Échange de chaleur par évaporation au niveau de la peau (E , en watts par mètre carré)

Le débit évaporatoire maximal (E_{max} , en watts par mètre carré) est celui que l'homme peut réaliser dans l'hypothèse d'une peau intégralement mouillée. Dans ces conditions

$$E_{max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_T \quad \dots(6)$$

où

$p_{sk,s}$ est la pression saturante de vapeur d'eau à la température moyenne de la peau, en kilopascals;

p_a est la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant, en kilopascals;

R_T est la résistance évaporatoire totale de la couche limite d'air et du vêtement, en mètres carrés kilopascals par watt.

Dans le cas d'une peau partiellement mouillée, le débit de chaleur par évaporation E , en watts par mètre carré, est donné par

$$E = w E_{max} \quad \dots(7)$$

où

w est la mouillure cutanée (sans dimension) définie comme étant la fraction équivalente de la peau qui peut être considérée comme totalement mouillée;

E_{max} est tel que défini dans l'équation (6).

4.1.9 Stockage de chaleur (S , en watts par mètre carré)

Le débit de stockage de chaleur du corps correspond à la somme algébrique des débits de chaleur définis précédemment.

4.2 Calcul du débit évaporatoire requis, de la mouillure cutanée requise et du débit sudoral requis

Compte tenu des hypothèses formulées concernant le débit de chaleur par conduction, l'équation générale du bilan thermique (1) peut s'écrire

$$E + S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R \quad \dots(8)$$

Le débit évaporatoire requis (E_{req} , en watts par mètre carré) pour le maintien en équilibre du bilan thermique et donc un débit de stockage nul est donné par

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R \quad \dots(9)$$

La mouillure cutanée requise (w_{req} , sans dimension) est définie comme étant le rapport entre le débit évaporatoire requis E_{req} et le débit évaporatoire maximal E_{max}

$$w_{req} = E_{req} / E_{max} \quad \dots(10)$$

Le calcul du débit sudoral requis doit se faire sur la base du débit évaporatoire requis mais doit, par ailleurs, tenir compte de la fraction de sueur qui peut, le cas échéant, ruisseler au sol du fait de la grande hétérogénéité des mouillures cutanées locales.

Le débit sudoral requis (SW_{req} , en watts par mètre carré) est donné par

$$SW_{req} = E_{req} / r_{req} \quad \dots(11)$$

où

r_{req} est l'efficacité évaporatoire de la sudation, (sans dimension), qui correspond à la mouillure cutanée requise;

E_{req} est tel que défini dans l'équation (9).

NOTE — Le débit sudoral, en watts par mètre carré, représente l'équivalent en chaleur du débit sudoral exprimé en grammes de sueur par mètre carré de peau et par heure, 1 W/m² correspondant à un débit de 1,47 g/(m².h) [pour un sujet standard (1,8 m² de surface de peau), à un débit de 2,6 g/h].

5 Interprétation du débit sudoral requis

5.1 Base de la méthode d'interprétation

L'interprétation des valeurs calculées par la méthode analytique préconisée se fait sur la base de deux critères de contrainte:

- la mouillure cutanée maximale (w_{max});
- le débit sudoral maximal (SW_{max});

et en fonction de deux limites d'astreinte

- le stockage maximal de chaleur (Q_{max} , en watts heure par mètre carré);
- la perte hydrique maximale acceptable (D_{max} , en grammes).

Le débit sudoral requis SW_{req} ne peut dépasser le débit sudoral maximal SW_{max} pouvant être mis en œuvre par le sujet. La mouillure cutanée requise w_{req} ne peut pas dépasser la mouillure cutanée réalisable par le sujet (w_{max}). Ces deux valeurs maximales sont fonction du degré d'acclimatation du sujet.

En cas de déséquilibre du bilan thermique, le stockage de chaleur doit être limité à une valeur maximale Q_{max} telle que l'élévation de la température Δt_{co} (en degrés Celsius) du noyau central du corps qui en résulte n'entraîne pas d'effets pathologiques.

Enfin, quel que soit le bilan thermique, la perte hydrique de l'organisme doit être limitée à une valeur maximale D_{\max} compatible avec le maintien de l'équilibre hydrominéral.

L'annexe C propose des valeurs-repères pour les critères de contrainte (w_{\max} et SW_{\max}) et les critères d'astreinte (Q_{\max} et D_{\max}). Des valeurs différentes sont proposées pour sujets acclimatés et non acclimatés et suivant le degré de protection souhaité (seuils d'alarme et de danger).

5.2 Analyse de la situation de travail

L'analyse de la situation de travail consiste à déterminer les valeurs prévues de la mouillure, du débit évaporatoire et du débit sudoral (w_p , E_p , SW_p), compte tenu des valeurs requises (w_{req} , E_{req} , SW_{req}) et des valeurs limites w_{\max} , SW_{\max} adoptées.

Lorsque la mouillure requise est inférieure à la mouillure maximale et que le débit sudoral requis est inférieur au débit sudoral maximal, l'équilibre thermique est maintenu et les valeurs prédites sont

$$w_p = w_{\text{req}} \quad \dots(12)$$

$$E_p = E_{\text{req}} \quad \dots(13)$$

$$SW_p = SW_{\text{req}} \quad \dots(14)$$

Si, par contre, la mouillure requise dépasse la mouillure maximale, on a

$$w_p = w_{\max} \quad \dots(15)$$

et dès lors

$$E_p = w_p E_{\max} \quad \dots(16)$$

$$SW_p = E_p / r_p \quad \dots(17)$$

où r_p est l'efficacité évaporatoire correspondant à w_p .

Si le débit sudoral requis ou le débit sudoral prédit à l'étape précédente est supérieur au débit sudoral maximal, il faut rechercher la mouillure prédite w_p et l'efficacité évaporatoire r_p telles que

$$w_p E_{\max} = SW_{\max} r_p \quad \dots(18)$$

connaissant la relation liant w_p et r_p .

$$\text{Dès lors } E_p = w_p E_{\max} \quad \dots(19)$$

$$\text{et } SW_p = SW_{\max} \quad \dots(20)$$

5.3 Détermination de la durée limite d'exposition (DLE, min)

La durée limite d'exposition peut être déterminée en fonction des valeurs admises pour le stockage maximal de chaleur (Q_{\max}) et la perte hydrique maximale (D_{\max}).

$$\text{Lorsque } E_p = E_{\text{req}} \quad \dots(21)$$

$$\text{et } SW_p < D_{\max} / 8 \quad \dots(22)$$

aucune limitation n'est à apporter à la durée de travail normale de 8 h. Dans ce cas, SW_p peut servir d'indice de comparaison des ambiances chaudes.

Si l'une de ces deux conditions n'est pas satisfaite, il convient de déterminer une durée limite d'exposition, DLE.

Si le débit évaporatoire requis n'est pas réalisé, la différence ($E_{\text{req}} - E_p$) représente le débit de stockage de chaleur qui est responsable d'une élévation de température du noyau central du corps. La durée limite (en minutes) peut être estimée par l'expression

$$DLE_1 = 60 Q_{\max} / (E_{\text{req}} - E_p) \quad \dots(23)$$

Lorsque, par contre, le débit sudoral risque de donner lieu à une perte hydrique exagérée, la durée de travail doit être limitée à

$$DLE_2 = 60 D_{\max} / SW_p \quad \dots(24)$$

La DLE la plus courte doit être prise en considération dans la limitation de la durée du travail.

Dans les situations de travail pour lesquelles

- soit le débit évaporatoire maximal E_{\max} est négatif, signifiant une condensation de vapeur d'eau sur la peau;
- soit la durée limite d'exposition estimée est inférieure à 30 min de sorte que les phénomènes de déclenchement de la sudation deviennent prépondérants dans l'appréciation de la perte évaporatoire du sujet,

des mesures particulières de précaution et une surveillance physiologique directe et individuelle des travailleurs sont particulièrement nécessaires. Les conditions de réalisation de cette surveillance et les techniques de mesure à employer seront décrites dans une future Norme internationale.

5.4 Organisation du travail à la chaleur

Lorsque la DLE₂ pour perte hydrique excessive est déterminante, aucune nouvelle exposition ne doit être tolérée dans la journée.

Lorsque la DLE₁ pour élévation de température centrale excessive est déterminante, il convient d'allouer au travailleur un repos d'une durée telle que, pour l'ensemble des séquences de travail et de repos, ne se pose plus de risque de contrainte thermique lorsque l'interprétation est menée comme indiqué ci-dessous. Dans le cas d'une situation de travail comprenant différentes conditions d'exposition à la chaleur, les méthodes d'analyse et d'interprétation décrites aux articles 4 et 5 devraient être appliquées à chaque séquence et chaque groupe successif de séquences d'exposition, une séquence étant définie comme une période de travail pendant laquelle les paramètres climatiques de même que les paramètres individuels restent approximativement constants.

L'interprétation d'une série de séquences successives doit être conduite en adoptant les valeurs moyennes, pondérées en fonction du temps, des valeurs E_{req} et E_{\max} de chacune de ces séquences.

Un programme d'ordinateur en BASIC (voir annexe D) adopte les expressions mathématiques de l'annexe A, ainsi que les critères et valeurs limites de l'annexe C. Il permet le calcul du débit sudoral prédit et des DLE pour toute séquence ou suite de séquences de travail pour lesquelles sont connus la production d'énergie métabolique, l'isolement vestimentaire et les paramètres climatiques.

Annexe A (informative)

Données complémentaires, nécessaires au calcul du bilan thermique

Les valeurs numériques ainsi que les équations données dans cette annexe correspondent à l'état actuel des connaissances. Certaines de ces expressions sont susceptibles d'être modifiées au fur et à mesure du progrès des connaissances.

A.1 Calcul du débit de chaleur par convection respiratoire, C_{res} , en watts par mètre carré

Le débit de chaleur par convection respiratoire peut être estimé à partir de la production d'énergie métabolique M par

$$C_{res} = 0,0014 M (t_{ex} - t_a) \quad \dots(A.1)$$

La température de l'air expiré (t_{ex}) varie légèrement en fonction de la température et de l'humidité de l'air inspiré. En pratique, étant donné que le débit de chaleur par convection respiratoire reste faible par rapport à d'autres facteurs, il s'avère suffisamment précis d'adopter, en milieu chaud, une valeur constante fixée à 35 °C, égale à celle observée pour une température d'air ambiant de 35 °C.

A.2 Calcul du débit de chaleur par évaporation respiratoire, E_{res} , en watts par mètre carré

Le débit de chaleur par évaporation respiratoire peut être estimé par

$$E_{res} = 0,0173 M (p_{ex} - p_a) \quad \dots(A.2)$$

où la pression de vapeur saturante de l'air expiré, p_{ex} , est égale à 5,624 kPa, pour une température t_{ex} de 35 °C.

A.3 Calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection, h_c , en watts par mètre carré kelvin

Pour un sujet debout, le coefficient h_c peut être estimé comme suit :

a) en convection naturelle, par

$$h_c = 2,38 |\bar{t}_{sk} - t_a|^{0,25} \quad \dots(A.3)$$

b) en convection forcée, par

$$h_c = 3,5 + 5,2 v_{ar} \quad (v_{ar} < 1 \text{ m/s}) \quad \dots(A.4)$$

$$h_c = 8,7 v_{ar}^{0,6} \quad (v_{ar} > 1 \text{ m/s}) \quad \dots(A.5)$$

où v_{ar} est la vitesse relative de l'air, en mètres par seconde.

La vitesse relative de l'air est la résultante de la vitesse de l'air par rapport au sol et de la vitesse du corps ou des segments corporels par rapport au sol. Dans le cas d'un sujet effectuant un travail musculaire, elle peut être, en première approximation, évaluée par

$$v_{ar} = v_a + 0,0052 (M - 58) \quad \dots(A.6)$$

où

v_a est la vitesse de l'air par rapport au sujet immobile, en mètres par seconde;

M est la puissance métabolique, en watts par mètre carré.

Il convient toutefois de plafonner l'augmentation de la vitesse de l'air due au travail à une valeur de 0,7 m/s.

Dans tous les cas, il convient de calculer les coefficients de transfert de chaleur par convection naturelle et forcée et de considérer le plus élevé des deux comme déterminant les débits de chaleur par convection.

A.4 Calcul du coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, h_r , en watts par mètre carré kelvin

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement peut être estimé comme suit :

$$h_r = \sigma \varepsilon_{sk} A_r/A_{Du} [(\bar{t}_{sk} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] / (\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r) \dots(A.7)$$

où

σ est la constante de Stefan-Boltzman, égale à $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ε_{sk} est l'émissivité cutanée (0,97);

A_r/A_{Du} est la fraction de surface cutanée participant aux échanges de chaleur par rayonnement. Cette fraction est prise égale à 0,67 pour le sujet accroupi; 0,70 pour le sujet assis et 0,77 pour le sujet debout.

\bar{t}_{sk} est tel que défini dans l'équation (4);

\bar{t}_r est tel que défini dans l'équation (5), en pratique souvent déterminée à partir de la température du globe t_g suivant les spécifications de l'ISO 7726.

A.5 Calcul du coefficient de réduction des échanges de chaleur sensible

Le facteur de réduction des échanges de chaleur sensible (F_{cl}) peut être évalué, dans le cas d'un vêtement léger et poreux, par

$$F_{cl} = 1 / [(h_c + h_r) I_{cl} + 1/f_{cl}] \quad \dots(A.8)$$

où

h_c et h_r sont les coefficients de transfert chaleur par convection et rayonnement définis aux articles A.3 et A.4;

I_{cl} est l'isolement thermique du vêtement, en mètres carrés kelvins par watt dont les valeurs sont proposées en annexe B; une méthode plus complète et plus précise sera décrite dans une future Norme internationale;

f_{cl} est le rapport entre la surface du sujet vêtu et la surface du sujet nu (sans dimension) et est donné par

$$f_{cl} = 1 + 1,97 I_{cl} \quad \dots(A.9)$$

A.6 Calcul de la résistance évaporatoire, R_T , en mètres carrés kilopascals par watt

La résistance évaporatoire peut être calculée sur la base de l'indice de perméabilité i_m du vêtement. La méthode et les données de base seront présentées dans une future Norme internationale.

Dans le cas d'un vêtement léger et poreux cependant, elle peut être estimée par

$$R_T = 1/h_e \cdot F_{pcl} \quad \dots(A.10)$$

où

h_e est le coefficient de transfert de chaleur par évaporation, en watts par mètre carré kilopascals, donné par

$$h_e = 16,7 h_c \quad \dots(A.11)$$

h_c étant le coefficient de transfert de chaleur par convection défini dans l'article A.3;

F_{pcl} étant le coefficient de réduction des échanges de chaleur sensible par le vêtement qui peut être évalué par

$$F_{pcl} = 1/[1 + 2,22 h_c (I_{cl} - (1 - 1/f_{cl})/(h_c + h_r))] \quad \dots(A.12)$$

où I_{cl} et f_{cl} sont tels que définis dans l'article A.5.

A.7 Calcul de l'efficacité évaporatoire de la sudation, r (sans dimension)

L'efficacité évaporatoire de la sudation, r , peut être évaluée à partir de la mouillure cutanée, w , par l'expression:

$$r = 1 - w^2/2 \quad \dots(A.13)$$

A.8 Calcul de la température opérative, t_o , en degrés Celsius

La température opérative (t_o) est donnée par

$$t_o = (h_c \cdot t_a + h_r \cdot \bar{t}_r)/(h_c + h_r) \quad \dots(A.14)$$

où

h_c est tel que défini dans l'article A.3;

t_a est tel que défini dans l'équation (2);

h_r est tel que défini dans l'article A.4;

\bar{t}_r est tel que défini dans l'équation (5).

Annexe B (informative)

Estimation des isolements thermiques d'ensembles vestimentaires

L'isolément thermique vestimentaire I_{cl} peut être estimé directement à partir des données de la table B.1 caractérisant des ensembles vestimentaires typiques, ou indirectement en additionnant les isoléments partiels de chacune des pièces de vêtement portées (tableau B.2).

Tableau B.1 – Isolement thermique pour des ensembles vestimentaires typiques

Vêtements de travail	I_{cl}		Vêtements de jour	I_{cl}	
	clo	m ² .K/W		clo	m ² .K/W
Caleçon, combinaison, chaussettes, chaussures	0,70	0,110	Slip, T-shirt, short, chaussettes fines, sandales	0,30	0,050
Caleçon, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0,75	0,115	Slip, jupon, bas, robe légère avec manches, sandales	0,45	0,070
Caleçon, chemise, combinaison, chaussettes, chaussures	0,80	0,125	Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures	0,50	0,80
Caleçon, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	0,85	0,135	Slip, bas, chemise à manches courtes, jupe, sandales	0,55	0,085
Caleçon, chemise, pantalon, blouse, chaussettes, chaussures	0,90	0,140	Caleçon, chemise, pantalon léger, chaussettes, chaussures	0,60	0,095
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,00	0,155	Slip, jupon, bas, robe, chaussures	0,70	0,105
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, combinaison, chaussettes, chaussures	1,10	0,170	Sous-vêtements chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0,70	0,110
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste isolante, chaussettes, chaussures	1,20	0,185	Sous-vêtements, survêtement (pull et pantalon), chaussettes montantes, chaussures de sport	0,75	0,115
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste isolante, chaussettes, chaussures	1,25	0,190	Slip, jupon, chemise, jupe, chaussettes montantes épaisses, chaussures	0,80	0,120
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, combinaison, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures	1,40	0,220	Slip, chemise, jupe, tricot ras du cou, chaussettes montantes épaisses, chaussures	0,90	0,140
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures	1,55	0,225	Caleçon, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, tricot col en V, chaussettes, chaussures	0,95	0,145
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures	1,85	0,285	Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,00	0,155
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2,00	0,310	Slip, bas, chemise, jupe, gilet, veste	1,00	0,155
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolants, sur-veste et sur-pantalon isolants, chaussettes, chaussures	2,20	0,340	Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures	1,10	0,170
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolants, Parka ouatinée, salopette ouatinée, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2,55	0,395	Sous-vêtements, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, veste	1,10	1,170
			Sous-vêtements, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, chaussettes, chaussures	1,15	0,180
			Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot col en V, veste, chaussettes, chaussures	1,30	0,200
			Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures	1,50	0,230