



Unité d'Ergonomie  
Faculté de Médecine  
Pitié-Salpêtrière  
91, bd de l'Hôpital  
75 634 Paris cedex 13  
[www.ergonomie.chups.jussieu.fr](http://www.ergonomie.chups.jussieu.fr)

DIPLÔME D'ERGONOMIE ET DE PHYSIOLOGIE DU TRAVAIL

option 2

Ergonomie de l'ambiance physique et psychosociale

Directeur du diplôme  
Docteur  
Bronislaw KAPITANIAK

# ambiance thermique

## 4



**bilan thermique**

**sudation requise**

# H

## débit de stockage de chaleur du corps

$$H = M - W + K + C + R - E \quad \text{en } Wm^{-2}$$

où :

**M** = production d'énergie métabolique

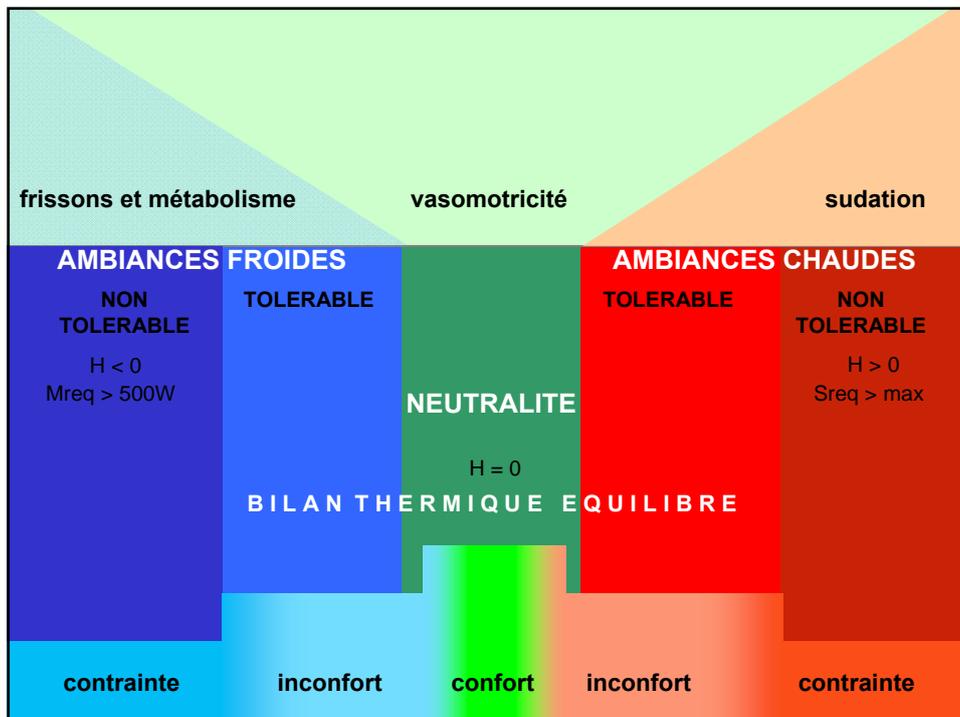
**W** = production d'énergie mécanique

**K** = débit de chaleur par conduction

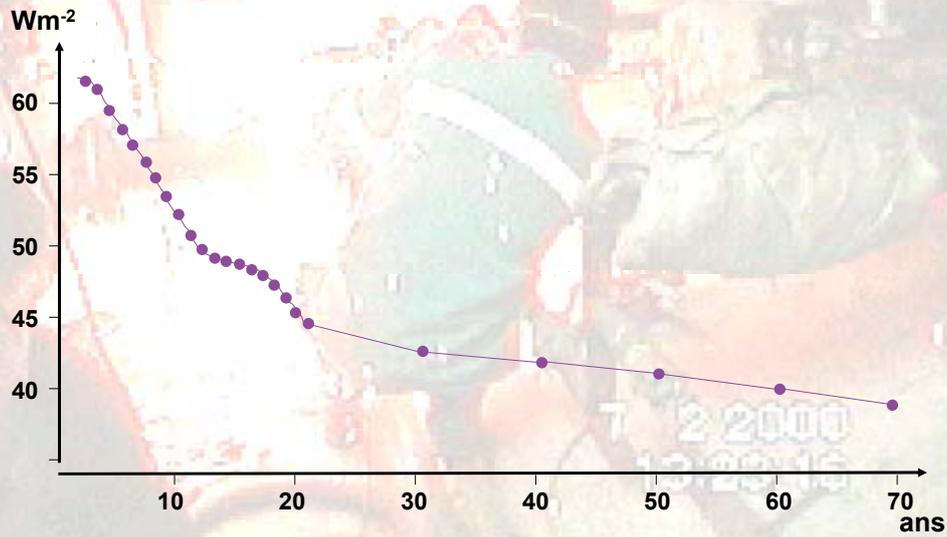
**C** = débit de chaleur par convection

**R** = débit de chaleur par rayonnement

**E** = débit de chaleur par évaporation



## métabolisme de base en fonction de l'âge



## estimation du métabolisme NF EN ISO 28996

Position du corps		Métabolisme (W/m <sup>2</sup> )	Type de travail	Métabolisme en fonction de la vitesse de déplacement (W·m <sup>-2</sup> ) / (m·s <sup>-1</sup> )		
Assis		10	Vitesse de déplacement en fonction de la distance			
Agenouillé		20			Marcher 2 km/h à 5 km/h	110
Accroupi		20			Marcher en montant, 2 km/h à 5 km/h	210
Debout		25				
Debout penché		30	Inclinaison 10°	360		
			Marcher en descendant, 5 km/h			
			Déclinaison 5°	60		
			Déclinaison 10°	50		
			Marcher avec une charge sur le dos, 4 km/h			
					Charge de 10 kg	125
					Charge de 30 kg	185
			Charge de 50 kg	285		
			Vitesse de déplacement en fonction de la hauteur			
			Monter un escalier	1 725		
			Descendre un escalier	480		
			Monter une échelle inclinée			
					Sans charge	1 660
					Avec charge de 10 kg	1 870
			Avec charge de 50 kg	3 320		
			Monter une échelle verticale			
					Sans charge	2 030
					Avec charge de 10 kg	2 335
			Avec charge de 50 kg	4 750		

Type de travail	Métabolisme (W/m <sup>2</sup> )	
	Valeur moyenne	Intervalle
Travail avec les mains		
léger	15	< 20
moyen	30	20 – 35
intense	40	> 35
Travail avec un bras		
léger	35	< 45
moyen	55	45 – 65
intense	75	> 65
Travail avec deux bras		
léger	65	< 75
moyen	85	75 – 95
intense	105	> 95
Travail du tronc		
léger	125	< 155
moyen	190	155 – 230
intense	280	230 – 330
très intense	390	> 330

ISO 7243	Classe	W/m <sup>2</sup>	Exemples
	Repos	70	Repos, assis
	Activité très légère	90	Travail manuel léger (écriture, frappe à la machine, dessin) ; travail des mains (petits outils d'établi, inspection, assemblage ou triage de matériaux légers)
	Activité légère	115	Travail des bras (conduite de véhicule dans des conditions normales, manœuvre d'un interrupteur à pied ou à pédale) ; usinage avec outils de faible puissance ; marche occasionnelle
	Activité modérée	145	Travail soutenu des mains et des bras (cloutage, limage) ; travail des bras et des jambes (manœuvre sur charniers de camions, tracteurs ou engins)
	Activité modérée à élevée	175	Travail des bras et du tronc ; travail au marteau pneumatique, accouplement de véhicules, manipulation intermittente de matériaux modérément lourds, poussée ou traction de charrettes légères ou de brouettes ; marche à une vitesse de 4 km/h à 5 km/h ; conduite de motoneige.
	Activité élevée	200	Travail intense des bras et du tronc : transport de matériaux lourds ; pelletage ; travail au marteau ; coupe d'arbres à la scie à chaîne ; action de faucher à la main, de creuser ; marcher à une vitesse de 5 km/h à 6 km/h Poussée ou traction de charrettes à bras ou de brouettes lourdement chargées ; enlèvement de copeaux de pièces moulées, pose de blocs de béton ; motoneige sur terrain lourd
Métabolisme énergétique très élevé	> 230	Activité très intense à allure rapide proche du maximum ; travailler à la hache ; action de pelleter ou de creuser avec intensité ; action de monter des escaliers, une rampe ou une échelle ; action de marcher rapidement à petits pas, de courir, de marcher à une vitesse supérieure à 6 km/h ; marcher dans la neige poudreuse profonde.	

## K conduction

$$K = k \cdot (T_1 - T_2)$$

où :

**k** = conductance thermique du corps solide (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>)

**T<sub>1</sub> - T<sub>2</sub>** = différence de température des 2 faces (K)

# C

## convection

$$C = h_c \cdot A_c / A_D \cdot (T_a - T_{sk})$$

où :

$h_c$  = coefficient de convection ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

$A_c$  = surface d'échange par convection

$A_D$  = surface corporelle totale

$T_a$  = température sèche de l'air (K)

$T_{sk}$  = température moyenne de la peau (K)

# C

## convection

$$C = h_c \cdot F_{cl} \cdot (t_{sk} - t_a)$$

où :

$h_c$  = coefficient de convection ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

$F_{cl}$  = facteur de réduction dû au vêtement

$t_a$  = température sèche de l'air ( $^{\circ}C$ )

$t_{sk}$  = température moyenne de la peau ( $^{\circ}C$ )

# $h_c$

## coefficient de convection

$$h_c = 2,38 \cdot (t_{sk} - t_a)^{1/4} \quad V_{ar} < 0,25 \text{ m/s}$$

$$h_c = 3,5 + 5,2 \cdot V_{ar} \quad V_{ar} < 1 \text{ m/s}$$

$$h_c = 8,7 \cdot V_{ar}^{0,6} \quad V_{ar} > 1 \text{ m/s}$$

où :

$t_a$  = température sèche de l'air (°C)

$t_{sk}$  = température moyenne de la peau (°C)

# $V_{ar}$

## vitesse relative de l'air

$$V_{ar} = V_a + 0,0052 (M - 58)$$

où :

$V_a$  = vitesse de l'air par rapport au sujet immobile ( $ms^{-1}$ )

$M$  = puissance de l'exercice ( $Wm^{-2}$ )

# $V_{ar}$

## vitesse relative de l'air

$$V_{ar} = V_a + 0,0052 (M - 58)$$

$V_a = 0$	$M = 70 \text{ Wm}^{-2}$	$V_{ar} = 0,06 \text{ ms}^{-1}$
$V_a = 0$	$M = 120 \text{ Wm}^{-2}$	$V_{ar} = 0,32 \text{ ms}^{-1}$
$V_a = 0$	$M = 175 \text{ Wm}^{-2}$	$V_{ar} = 0,61 \text{ ms}^{-1}$
$V_a = 0$	$M = 230 \text{ Wm}^{-2}$	$V_{ar} = 0,89 \text{ ms}^{-1}$

# $h_c$

## coefficient de convection

$$t_a = 25^\circ\text{C} \quad t_{sk} = 33^\circ\text{C}$$

$h_c = 4$	si	$V_a < 0,1 \text{ m/s}$
$h_c = 6$	si	$V_a = 0,5 \text{ m/s}$
$h_c = 8$	si	$V_a = 1 \text{ m/s}$
$h_c = 11$	si	$V_a = 1,5 \text{ m/s}$
$h_c = 13$	si	$V_a = 2 \text{ m/s}$

# C

## convection respiratoire

$$C_{\text{res}} = c_p \cdot \dot{V} \cdot (t_{\text{ex}} - t_a) / A_{\text{du}}$$

où :

$c_p$  = chaleur spécifique de l'air ( $\text{Jkg}^{-1}$ )

$\dot{V}$  = débit ventilatoire ( $\text{l s}^{-1}$ )

$t_a$  = température sèche de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{\text{ex}}$  = température de l'air expiré ( $^{\circ}\text{C}$ )

$A_{\text{du}}$  = surface corporelle ( $\text{m}^2$ )

# R

## rayonnement

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{\text{clR}} \cdot A_r / A_D \cdot (T_r^4 - T_{\text{sk}}^4)$$

$\varepsilon$  = émissivité du corps humain (0,97)

$\sigma$  = constante universelle de rayonnement ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$F_{\text{clR}}$  = facteur de réduction dû au vêtement

$A_r$  = surface d'échange par rayonnement

$A_D$  = surface corporelle totale

$T_{\text{sk}}$  = température moyenne de la peau (K)

$T_r$  = température moyenne de rayonnement de l'environnement (K)

**$t_r$**

**température moyenne de rayonnement**

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot V_a^{0,6} (t_g - t_a)]^{1/4} - 273$$

si  $V_a = 0$  alors  $t_r = t_g$

si  $V_a = 1$   $t_a = 40^\circ$   $t_g = 50^\circ$  alors  $t_r = 67^\circ$

**R**

**rayonnement**

$$R = h_r \cdot F_{cl} \cdot (t_{sk} - t_r)$$

$h_r$  = coefficient de rayonnement

$F_{cl}$  = facteur de réduction dû au vêtement

$t_{sk}$  = température moyenne de la peau (K)

$t_r$  = température moyenne de rayonnement (K)

# $h_r$

## coefficient de rayonnement

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_{sk} \cdot A_r / A_D \cdot (T_{sk}^4 - T_r^4) / (T_{sk} - T_r)$$

où :

$\varepsilon_{sk}$  = émissivité cutanée

$\sigma$  = constante universelle de rayonnement

$A_r$  = surface d'échange par rayonnement

$A_D$  = surface corporelle totale

$T_{sk}$  = température moyenne de la peau (K)

$T_r$  = température moyenne de rayonnement de l'environnement (K)

# $h_r$

## coefficient de rayonnement

$h_r = 5$  si  $\Delta t = -10^\circ\text{C}$

$h_r = 6$  si  $\Delta t = +30^\circ\text{C}$

## $F_{cl}$

facteur de réduction dû au vêtement

$$F_{cl} = 1 / [(h_c + h_r) \cdot I_{cl} + 1 / (1 + 1,97 I_{cl})]$$

$$F_{cl} = 0,37 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 1 \text{ clo}$$

$$F_{cl} = 0,42 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 0,8 \text{ clo}$$

$$F_{cl} = 0,51 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 0,6 \text{ clo}$$

$$F_{cl} = 0,6 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 0,4 \text{ clo}$$

$$F_{cl} = 0,75 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 0,2 \text{ clo}$$

$$F_{cl} = 1 \quad \text{si} \quad I_{cl} = 0 \text{ clo}$$

pour  $h_c = 7$  et  $h_r = 5,5$

## $E$

évaporation

$$E = h_e \cdot A_e / A_D (P_a - P_{sk,s})$$

$$E = h_e \cdot F_{cl} (P_a - P_{sk,s})$$

où :

$h_e$  = coefficient d'évaporation ( $W m^{-2} kPa^{-1}$ )

$A_e$  = surface d'échange par évaporation

$A_D$  = surface corporelle totale

$F_{cl}$  = facteur de réduction dû au vêtement

$P_a$  = pression de vapeur d'eau ambiante (kPa)

$P_{s,sk}$  = pression saturante de vapeur d'eau cutanée (kPa)

**$h_e$**

**coefficient d'évaporation**

$$h_e = 16,7 h_c$$

**$E_{max}$**

**évaporation maximale**

$$E_{max} = (P_{sk,s} - P_a) / R_T$$

où :

$P_a$  = pression de vapeur d'eau ambiante (kPa)

$P_{s,sk}$  = pression saturante de vapeur d'eau cutanée (kPa)

$R_T$  = résistance évaporatoire totale

## $E_{res}$

### évaporation respiratoire

$$E_{res} = c_e \cdot V \cdot (W_{ex} - W_a) / A_{du}$$

où :

$c_e$  = chaleur d'évaporation de l'eau ( $Jkg^{-1}$ )

$V$  = débit ventilatoire ( $ls^{-1}$ )

$W_{ex}$  = rapport d'humidité de l'air expiré

$W_a$  = rapport d'humidité de l'air inspiré

$A_{du}$  = surface corporelle ( $m^2$ )

## $E_{res}$

### évaporation respiratoire

$$E_{res} = 0,0173 \cdot M (P_a - 5,87)$$

# E

## débit par évaporation

$$E = w \cdot E_{\max}$$

où :

$w_a$  = mouillure cutanée

$E_{\max}$  = évaporation maximale permise par l'environnement

# H<sub>req</sub>

## évaporation requise

$$E_{\text{req}} = M - W - C_{\text{res}} - E_{\text{res}} - C - R$$

où :

**M** = production d'énergie métabolique

**W** = puissance mécanique utile

**C<sub>res</sub>** = débit de chaleur par convection respiratoire

**E<sub>res</sub>** = débit de chaleur par évaporation respiratoire

**C** = débit de chaleur par convection

**R** = débit de chaleur par rayonnement

## $W_{req}$

### mouillure requise

$$W_{req} = E_{req} / E_{max}$$

où :

$E_{req}$  = évaporation requise

$E_{max}$  = évaporation maximale

## $SW_{req}$

### sudation requise

$$SW_{req} = E_{req} / r$$

où :

$E_{req}$  = évaporation requise

$r$  = efficacité évaporatoire de la sudation

$r = 1$  si  $w < 0,5$

$r = 0,8$  si  $w < 0,75$

$r = 0,5$  si  $w < 1$

# **SW<sub>req</sub>**

**sudation requise en ml/min**

$$\mathbf{SW_{req} = E_{req} / r \cdot A_D / 0,674}$$

où :

**E<sub>req</sub>** = évaporation requise

**r** = efficacité évaporatoire de la sudation

**A<sub>D</sub>** = surface corporelle

# **DLE**

**durée limite d'exposition**

évaporation permise par l'ambiance

stockage maximal de chaleur

perte hydrique maximale

possibilité de réhydratation

# DLE

durée limite d'exposition

$$DLE1 = 60 Q_{max} / (E_{req} - E_p)$$

$$DLE2 = 60 D_{max} / SW_p$$

où :

$Q_{max}$  = stockage maximal de chaleur

$E_{req}$  = évaporation requise

$E_p$  = évaporation prévisible

$D_{max}$  = perte hydrique maximale

$SW_p$  = débit sudoral prévisible

## sudation requise

Critère	Sujets non acclimatés		Sujets acclimatés	
	Alarme	Danger	Alarme	Danger
<b>Mouillure cutanée maximale</b> $W_{max}$	0,85	0,85	1,0	1,0
<b>Sudation maximale</b>				
Repos :				
$M < 65 \text{ W/m}^2$	$SW_{max}$ W/m <sup>2</sup> 260	150 390	200 520	300 780
Travail :				
$M \geq 65 \text{ W/m}^2$	$SW_{max}$ W/m <sup>2</sup> 520	250 650	300 780	400 1 040
<b>Stockage de chaleur maximal</b> $Q_{max}$ W.h/m <sup>2</sup>	50	60	50	60
<b>Perte hydrique maximale</b> $D_{max}$ W.h/m <sup>2</sup> g	1 000 2 600	1 250 3 250	1 500 3 900	2 000 5 200

## sudation requise

Exemples	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Acclimaté	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Posture	Debout	Debout	Debout	Debout	Assis	Assis	Debout	Debout	Debout	Debout
$t_a$ (°C)	40	35	30	28	35	43	35	34	40	40
$P_a$ (kPa)	2,5	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
$t_r$ (°C)	40	35	50	58	35	43	35	34	40	40
$v_a$ (m s <sup>-1</sup> )	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$M$ (W m <sup>-2</sup> )	150	150	150	150	150	103	206	150	150	150
$I_a$ (clo)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,4	0,4
$\theta$ (degrés)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
Vitesse de marche (m s <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$t_{e \text{ finale}}$ (°C)	37,5	39,8	37,7	41,2	37,6	37,3	39,2	41,0	37,5	37,6
Perte hydrique (g)	6168	6933	7166	5807	3892	6763	7236	5548	6684	5379
D <sub>inter</sub> (min)	480	74	480	57	480	480	70	67	480	480
D <sub>interclass</sub> (min)	439	385	380	466	480	401	372	480	407	480
D <sub>class</sub> (min)	298	256	258	314	463	271	247	318	276	339



**SUDREQ 2004**

Détermination de la durée limite d'exposition au travail en ambiance chaude  
par le calcul de la sudation requise selon la norme NF EN 12515

*B. LANDRY - J. OJALVO*

---

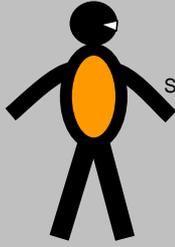
**I - Détermination des valeurs limites des critères d'astreinte sudorale et thermique**

Acclimatement

Non acclimaté     Acclimaté

Seuil

Alarme     Danger



Mouillure cutanée maximale ( $W_{max}$ ) : **100%**

Sudation maximale au travail ( $SW_{max}$ ) : **300** W/m<sup>2</sup> soit : **780** g/h

Perte hydrique maximale ( $D_{max}$ ) : **1500** Wh/m<sup>2</sup> soit : **3,9** litres

Stockage maximal de chaleur ( $Q_{max}$ ) : **50** Wh/m<sup>2</sup>

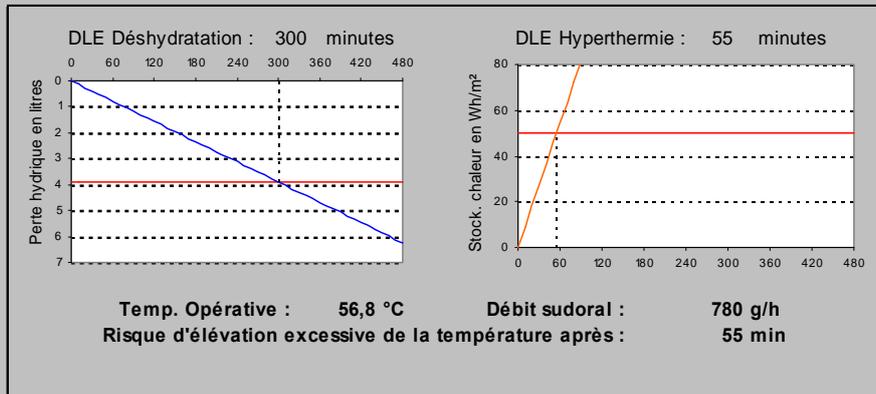
Suivant

Info

RESULTAT

Sujet Acclimaté

Seuil Alarme



Détail calculs

Rapport

Analyse

Simulation

Retour