



Unité d'Ergonomie
Faculté de Médecine
Pitié-Salpêtrière
91, bd de l'Hôpital
75 634 Paris cedex 13

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

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

où :

M = production d'énergie métabolique

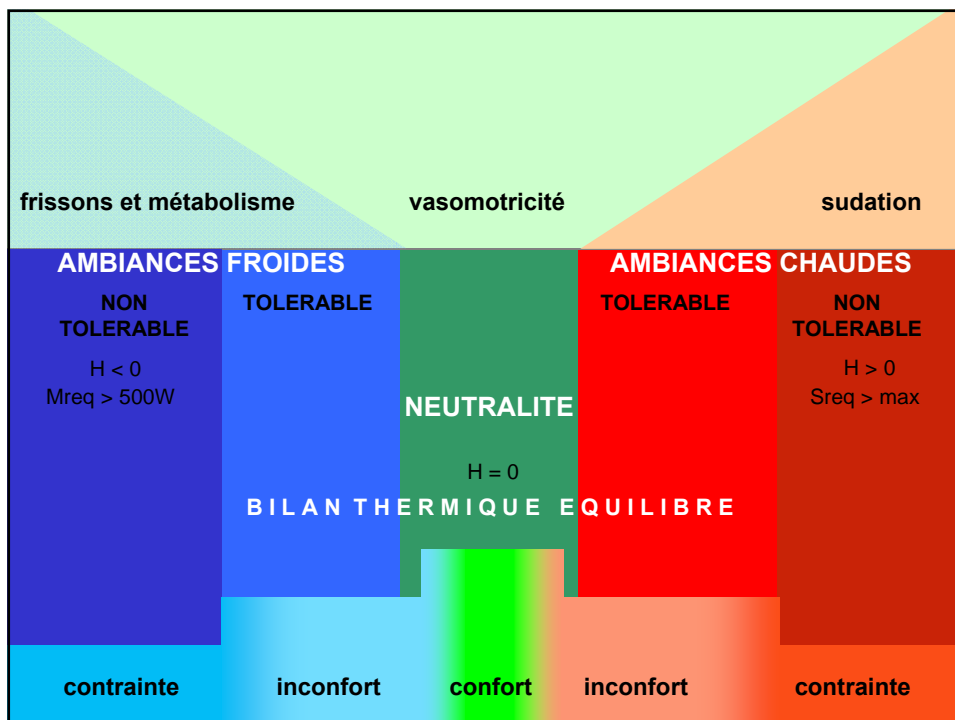
W = production d'énergie mécanique

K = débit de chaleur par conduction

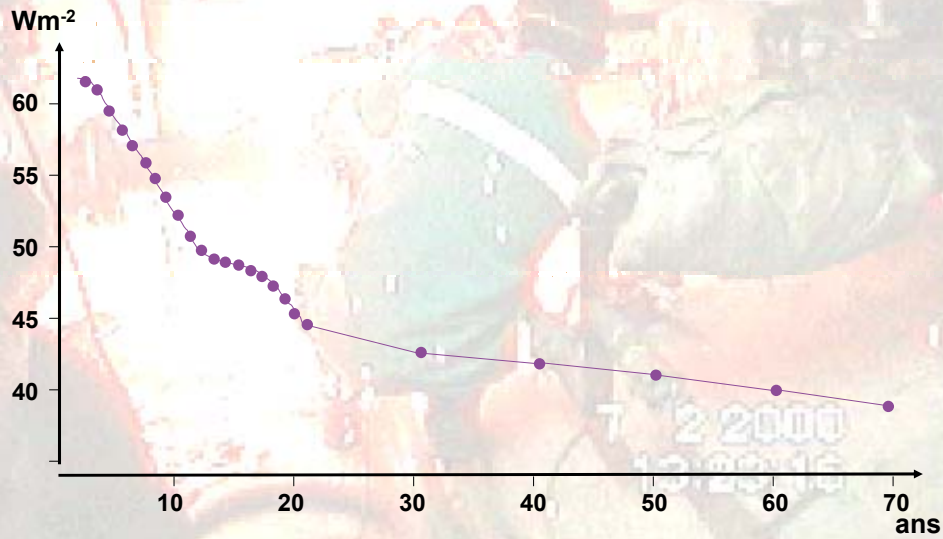
C = débit de chaleur par convection

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

Type de travail	Métabolisme (W/m ²)	
	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 ²	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⁻²K⁻¹)

T₁ - T₂ = 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 ($^{\circ}\text{C}$)

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

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 (Jkg^{-1})

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

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

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

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

R

rayonnement

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

ε = émissivité du corps humain (0,97)

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

F_{clR} = facteur de réduction dû au vêtement

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)

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 :

ε_{sk} = émissivité cutanée

σ = 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_{req}

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_{res} = débit de chaleur par convection respiratoire

E_{res} = 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_{req}

sudation requise en ml/min

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

où :

E_{req} = évaporation requise

r = efficacité évaporatoire de la sudation

A_D = 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

$$\text{DLE1} = 60 Q_{\text{max}} / (E_{\text{req}} - E_{\text{p}})$$

$$\text{DLE2} = 60 D_{\text{max}} / \text{SW}_{\text{p}}$$

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
Mouillure cutanée maximale W_{max}	0,85	0,85	1,0	1,0
Sudation maximale				
Repos :				
$M < 65 \text{ W/m}^2$	SW_{max}	W/m^2 g/h		
Travail :				
$M \geq 65 \text{ W/m}^2$	SW_{max}	W/m^2 g/h		
Stockage de chaleur maximal				
Q_{max}	W.h/m^2			
Perte hydrique maximale				
D_{max}	W.h/m^2 g			

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 ⁻¹)	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
M (W m ⁻²)	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
θ (degrés)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
Vitesse de marche (m s ⁻¹)	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_{inter} (min)	480	74	480	57	480	480	70	67	480	480
$D_{\text{interclass}}$ (min)	439	385	380	466	480	401	372	480	407	480
D_{extclass} (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/m² soit : **780** g/h

Perte hydrique maximale (D_{max}) : **1500** Wh/m² soit : **3,9** litres

Stockage maximal de chaleur (Q_{max}) : **50** Wh/m²

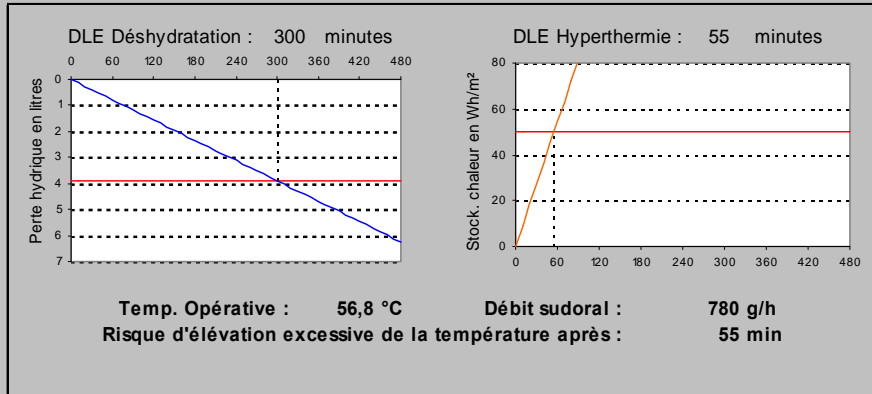
Suivant

Info

RESULTAT

Sujet Acclimaté

Seuil Alarme



Détail calculs

Rapport

Analyse

Simulation

Retour