

Les indices de contrainte thermique: formules et définitions

I. L'indice de stress thermique (Index of Thermal Stress (ITS))

L'équation améliorée de l'équilibre thermique est:

$$E_{req} = H - (C + R) - R_s$$

où E_{req} est l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique, où R_s est la charge solaire et où la production de chaleur métabolique H est utilisée au lieu de la dépense énergétique pour tenir compte du travail externe. Une amélioration importante consiste à reconnaître que toute la sueur ne s'évapore pas (par exemple, une partie ruisselle); le débit sudoral requis a donc la relation suivante avec l'évaporation requise:

$$SW = E_{req} / nsc$$

où nsc est l'efficacité de la sudation.

A l'intérieur des bâtiments, le transfert thermique sensible se calcule par:

$$R + C = \alpha v^{0,3} (35 - T_g)$$

En plein air, avec charge solaire, T_g est remplacé par T_a et une marge est prise pour la charge solaire (R_s) par:

$$R_s = E_s K_{pe} K_{cl} (1 - \alpha v^{0,2} - 0,88)$$

Les équations utilisées sont déduites des données expérimentales et ne sont pas strictement rationnelles.

La déperdition de chaleur maximale par évaporation est:

$$E_{max} = K_p v^{0,3} (56 - P_a)$$

et l'efficacité de la sudation est donnée par:

$$nsc = \exp \{-0,6 [(E_{req}/E_{max}) - 0,12]\}$$

mais

$$nsc = 1 \text{ si } E_{req}/E_{max} < 0,12$$

et

$$nsc = 0,29 \text{ si } E_{req}/E_{max} > 2,15$$

L'indice de stress thermique (ITS) en g/h est donné par:

$$ITS = (H - (R + C) - R_s) / (0,37 nsc)$$

où $(H - (R + C) - R_s)$ est le taux d'évaporation requis E_{req} , 0,37 permet de convertir W/m^2 en g/h et nsc est l'efficacité de la sudation (McIntyre, 1980).

II. Le débit sudoral requis

Comme les autres indices rationnels, SW_{req} est établi d'après les six paramètres fondamentaux (température de l'air (T_a), température radiante (T_r), humidité relative, vitesse de l'air (v), isolement des vêtements (I_{clo}), dépense énergétique (M) et travail externe (W). Les valeurs effectives de la surface du rayonnement pour la posture (position assise = 0,72, position debout = 0,77) sont également nécessaires. Ainsi, l'évaporation requise se calcule par:

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

Des équations sont prévues pour chaque paramètre (voir tableaux 42.8 et 42.9). La température moyenne de la peau se calcule par une équation de régression linéaire multiple ou une valeur de 36 °C est admise.

L'évaporation requise (E_{req}), l'évaporation maximale (E_{max}) et l'efficacité de la sudation (r) permettent de calculer:

$$\text{Humidité requise de la peau } W_{req} = E_{req} / E_{max}$$

$$\text{Débit sudoral requis } SW_{req} = E_{req} / r$$

III. Le débit sudoral prévu sur 4 heures (P4SR)

McIntyre (1980) a récapitulé de la manière suivante les étapes pour obtenir la valeur de l'indice P4SR:

Si $T_g \neq T_a$, augmenter la température humide de 0,4 ($T_g - T_a$) °C.

Si le taux métabolique $M > 63 W/m^2$, augmenter la température humide de la valeur indiquée par le nomogramme de prévision du P4SR (voir figure 42.6).

Si les sujets sont vêtus, augmenter la température humide de 1,5 (I_{clo}) °C.

Ces majorations s'additionnent.

Le (P4SR) est déterminé d'après la figure 42.6. Celui-ci est alors corrigé selon l'équation:

$$P4SR = P4SR + 0,37 I_{clo} + (0,012 + 0,001 I_{clo}) (M - 63).$$

IV. La fréquence cardiaque

$$FC = 22,4 + 0,18M + 0,25 (5T_a + 2P_a)$$

où M est la dépense énergétique en W/m^2 , T_a la température de l'air en °C et P_a la pression de vapeur en Mb.

Givoni et Goldman (1973) fournissent des équations pour prévoir la fréquence cardiaque d'individus (soldats) placés dans des environnements chauds. Ils définissent un indice de fréquence cardiaque (IFC) à partir d'une modification de la température rectale prévue à l'équilibre.

$$T_{ref} = 36,75 + 0,004(M - W_{ex}) + (0,025/clo) (T_a - 36) + 0,8e^{0,0047} (E_{req} - E_{max}).$$

IFC est alors:

$$IFC = 0,4M + (2,5/clo) (T_a - 36) + 80e^{0,0047} (E_{req} - E_{max})$$

où M = taux métabolique (watts), W_{ex} = travail mécanique (watts), clo = isolation thermique des vêtements, T_a = température de l'air (°C), E_{req} = charge totale de chaleur métabolique et environnementale (watts), E_{max} = capacité de refroidissement par évaporation pour les vêtements et l'environnement (watts).

La fréquence cardiaque à l'équilibre (FC_i en battements par minute) est alors donnée par:

$$FC_i = 65 + 0,35 (IFC - 25) \text{ pour } IFC \leq 225$$

c'est-à-dire une relation linéaire entre température rectale et fréquence cardiaque pour des fréquences cardiaques maximales de 150 battements par minute. Pour $IFC > 225$:

$$FC_i = 65 + (FC_i - 65) (1 - e^{-3t})$$

c'est-à-dire une relation exponentielle au fur et à mesure que la fréquence cardiaque approche du maximum, où:

FC_i = fréquence cardiaque à l'équilibre (bpm);

65 = fréquence cardiaque au repos supposée, dans des conditions confortables (bpm) et t = temps en heures.

V. L'indice de température humide et de globe noir (Wet Bulb Globe Temperature) (WBGT)

La température de globe noir et de thermomètre à boule mouillée est donnée par:

$$WBGT = 0,7T_{nwb} + 0,2T_g + 0,1T_a$$

dans des conditions avec rayonnement solaire, et:

$$WBGT = 0,7T_{nwb} + 0,3T_g$$

pour des conditions intérieures sans rayonnement solaire, où T_{nwb} = température humide naturelle (ventilation naturelle et non forcée), T_a = température de l'air et T_g = température d'un globe noir de 150 mm de diamètre.

Les indices empiriques

La température effective et la température effective corrigée

L'indice de température effective (Houghton et Yaglou, 1923) a été établi à l'origine pour fournir une méthode de détermination des effets relatifs de la température et de l'humidité de l'air sur le confort. Trois sujets ont été priés de juger laquelle de deux chambres climatiques était la plus chaude en allant de l'une à l'autre. Des lignes d'égal confort ont été déterminées au moyen de diverses combinaisons de température et d'humidité de l'air (puis d'autres paramètres par la suite). Les impressions ont été immédiates, de sorte que seule cette réponse transitoire a été enregistrée. Cela a eu pour conséquence de donner une trop grande importance à l'effet de l'humidité aux basses températures et de le sous-estimer aux températures élevées (par rapport aux réponses à l'état d'équilibre). Bien qu'à l'origine on ait recherché un indice de confort, le fait d'utiliser la température de globe noir pour remplacer la température du thermomètre sec dans les nomogrammes de ET a fourni la température effective corrigée (Corrected Effective Temperature (CET)) (Bedford, 1940). Selon la recherche rapportée par Macpherson (1960), CET permettait de prévoir les effets physiologiques de l'élévation de la température rayonnante moyenne. ET et CET sont maintenant rarement appliquées comme indices de confort, mais elles ont été utilisées comme indices de contrainte thermique. Bedford (1940) a proposé CET comme indice à la chaleur, avec des limites supérieures de 34 °C pour une «efficacité raisonnable» et de 38,6 °C pour la tolérance. Mais une autre investigation a montré que, comme indice de contrainte thermique, ET présentait de sérieux inconvénients, ce qui a conduit à mettre au point l'indice de débit sudoral prévu sur 4 heures (Predicted Four Hours Sweat Rate (P4SR)).

Le débit sudoral prévu sur 4 heures

L'indice du débit sudoral prévu sur 4 heures (P4SR) a été établi à Londres par McArdle et coll. (1947) et évalué à Singapour à l'issue de 7 années de travaux rapportés par Macpherson (1960). Il s'agit de la quantité de sueur sécrétée par des hommes jeunes, en forme, acclimatés, exposés à l'environnement pendant 4 heures tout en portant des fusils et leurs munitions durant un engagement naval. Le chiffre unique (valeur de l'indice) qui résume les effets des six paramètres fondamentaux correspond à la quantité de sueur sécrétée par la population considérée, mais il est à utiliser comme valeur d'indice et non pas comme une indication d'une quantité de sueur d'un groupe particulier.

Il a été reconnu qu'en dehors de la zone normative (par exemple, P4SR > 5 litres) le débit sudoral n'était pas un bon indicateur de l'astreinte thermique. Les nomogrammes de P4SR (voir figure 42.6) ont été réajustés pour tenter d'en tenir compte. Le P4SR semble avoir été utile pour les conditions dans lesquelles il a été établi; cependant, les effets des vêtements sont trop simplifiés et il est valable surtout en tant qu'indice de stockage de la chaleur. McArdle et coll. (1947) ont proposé un P4SR de 4,5 litres comme limite au-dessous de laquelle aucun homme jeune, en forme et acclimaté, n'est dans l'incapacité de travailler.

La prévision de la fréquence cardiaque en tant qu'indice

Fuller et Brouha (1966) ont proposé un indice simple basé sur la prévision de la fréquence cardiaque (FC) exprimée en battements par minute. La relation, telle qu'elle a été formulée initialement avec un métabolisme énergétique exprimé en Btu/h et une pression partielle de vapeur d'eau en mm de Hg, fournissait une prévision simple de la fréquence cardiaque à partir de $(T + p)$, d'où l'indice $T + p$.

Givoni et Goldman (1973) proposent également des équations de la variation de la fréquence cardiaque en fonction du temps avec les corrections du degré d'acclimatement des sujets (voir

Tableau 42.5 • Modèle utilisant la fréquence cardiaque pour évaluer la contrainte thermique

Fréquence cardiaque totale	Niveau d'activité
FC_0	Repos (neutralité thermique)
$FC_0 + FC_M$	Travail
$FC_0 + FC_S$	Exercice statique
$FC_0 + FC_T$	Astreinte thermique
$FC_0 + FC_N$	Emotion (psychologique)
$FC_0 + FC_e$	Résiduel

D'après Vogt et coll., 1981 et ISO, 1992.

«IV. La fréquence cardiaque» dans l'encadré intitulé «Les indices de contrainte thermique: formules et définitions».

Une méthode de détermination de la fréquence cardiaque au travail et durant la récupération est décrite par l'Institut national de la sécurité et de la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (NIOSH, 1986) (d'après Brouha 1960; Fuller et Smith 1980, 1981). La température du corps et les fréquences du pouls sont mesurées durant la récupération après un cycle de travail ou à des moments spécifiques durant la journée de travail. A la fin du cycle de travail, le travailleur est prié de s'asseoir; sa température orale est relevée et les trois fréquences du pouls ci-après sont enregistrées:

- P_1 — fréquence du pouls comptée de 30 secondes à 1 minute;
- P_2 — fréquence du pouls comptée de 1,5 à 2 minutes;
- P_3 — fréquence du pouls comptée de 2,5 à 3 minutes.

Le critère final de contrainte thermique est une température orale de 37,5 °C.

Si $P_3 \leq 90$ bpm et $P_3 - P_1 = 10$ bpm, cela signifie que le niveau de travail est élevé, mais qu'il y a peu d'élévation de la température du corps. Si $P_3 > 90$ bpm et $P_3 - P_1 < 10$ bpm, la contrainte

Tableau 42.6 • Les valeurs de référence WBGT selon la norme ISO 7243

Niveau métabolique M (Wm^{-2})	Valeur de référence WBGT			
	Personne acclimatée à la chaleur (°C)		Personne non acclimatée à la chaleur (°C)	
0. Repos $M \leq 65$	33		32	
1. $65 < M \leq 130$	30		29	
2. $130 < M \leq 200$	28		26	
	Pas de mouvement d'air sensible	Mouvement d'air sensible	Pas de mouvement d'air sensible	Mouvement d'air sensible
3. $200 < M < 260$	25	26	22	23
4. $M > 260$	23	25	18	20

Source: ISO, 1989a.

Note: les valeurs indiquées ont été établies en admettant une température rectale maximale de 38 °C pour les personnes concernées.

Tableau 42.7 • Recommandations pratiques pour le travail dans les ambiances chaudes

A. Recommandations techniques	Exemple
1. Réduire la source de chaleur	Eloigner les travailleurs ou réduire la température. Pas toujours réalisable
2. Régulation de la chaleur apportée par convection	Modifier la température et les mouvements de l'air. Des appareils réfrigérants ponctuels peuvent être utiles
3. Régulation de la chaleur rayonnante	Réduire les températures des surfaces ou placer un écran réfléchissant entre source rayonnante et travailleurs. Modifier le pouvoir d'émission des surfaces. Prévoir des portes qui ne s'ouvrent que si l'accès est nécessaire
4. Régulation de la perte de chaleur due à l'évaporation	Accroître le mouvement de l'air, réduire la pression partielle de vapeur d'eau. Prévoir des ventilateurs ou la climatisation. Humidifier les vêtements et souffler de l'air sur le sujet
B. Pratiques de travail et d'hygiène, mesures organisationnelles de prévention	Exemple
1. Limiter le temps d'exposition ou la température	Exécuter les travaux aux heures les plus fraîches de la journée et de l'année. Prévoir des zones fraîches pour le repos et la récupération. Prévoir du personnel supplémentaire, laisser aux travailleurs la liberté d'interrompre le travail, augmenter l'apport en eau
2. Réduire la charge de travail physique	Mécanisation. Concevoir le travail différemment. Réduire le temps de travail. Augmenter l'effectif
3. Accroître la durée de tolérance	Programme d'acclimatation à la chaleur. Maintenir les travailleurs en forme physique. Assurer la compensation de la perte hydrique et maintenir au besoin l'équilibre en électrolytes
4. Formation à la sécurité et à la santé	Agents de maîtrise formés de manière à détecter les signes de maladie provoquée par la chaleur et à connaître les premiers secours. Enseignement élémentaire à tout le personnel sur les précautions individuelles, le port d'un équipement de protection et les effets des facteurs non professionnels (par exemple, alcool). Adoption d'un système de «camaraderie». Des plans éventuels de traitement doivent être mis en place
5. Sélection pour tenir compte de l'intolérance à la chaleur	Antécédents de maladie provoquée par la chaleur. Mauvaise forme physique
C. Programme d'alerte en cas de chaleur	Exemple
1. Au printemps, constituer une commission d'alerte en cas de chaleur (médecin ou infirmière du travail, hygiéniste du travail, technicien de la sécurité, ingénieur d'exploitation, cadre supérieur)	Organiser un cours de formation. Notes aux agents de maîtrise afin qu'ils vérifient les distributeurs de boissons, etc. Contrôler les installations, les pratiques, la disposition, etc.
2. Déclarer une alerte à la chaleur durant une période prévue de temps chaud	Ajourner les tâches non urgentes. Accroître l'effectif de travailleurs, augmenter le repos. Rappeler aux travailleurs qu'ils doivent boire. Améliorer les pratiques de travail
D. Refroidissement auxiliaire du corps et vêtements de protection	
A utiliser dans les cas où le travailleur ne peut pas être remplacé, s'il n'est pas possible de changer le travail ou l'environnement et si la contrainte thermique continue à dépasser les limites. Les sujets doivent être parfaitement acclimatés à la chaleur et bien entraînés à l'utilisation et à la pratique du port de vêtements de protection. Exemples: vêtements refroidis par eau, vêtements refroidis par air, gilets glacés et vêtements de dessus mouillés	
E. Dégradation de la performance	
Il faut rappeler que le port de vêtements de protection contre les agents toxiques accroît la contrainte thermique. Tous les vêtements gênent les activités et peuvent réduire la performance (par exemple, réduction de la perception des informations sensorielles, donc altération de l'ouïe ou de la vision)	

Source: NIOSH, 1986.

(chaleur + travail) est trop élevée et des mesures doivent être prises pour concevoir le travail différemment.

Vogt et coll. (1981) et la norme ISO 9886 (ISO, 1992) fournissent un modèle (voir tableau 42.5) qui utilise la fréquence cardiaque pour évaluer les conditions ambiantes thermiques.

La composante de la contrainte thermique (indice de l'astreinte thermique possible) peut être calculée par:

$$FC_t = FC_r - FC_0$$

où HR_t est la fréquence cardiaque après récupération et HR_0 la fréquence cardiaque de repos dans un milieu thermiquement neutre.

Les indices directs de contrainte thermique

L'indice de température humide et de globe noir (WBGT)

L'indice de température humide et de globe noir (Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)) est de loin le plus largement répandu dans le monde. Il a été établi par la marine américaine, au cours d'une investigation sur des accidents causés par la chaleur durant l'entraînement (Yaglou et Minard, 1957), en tant qu'approximation de la peu commode CET, modifiée pour tenir compte de la capacité d'absorption des rayons solaires des uniformes militaires.

Tableau 42.8 • Equations utilisées dans le calcul de l'indice SW_{req} et méthode d'évaluation prévue par la norme ISO 7933

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{f_{eq}}$$

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

$$C_{res} = 0,0014 M (35 - t_a)$$

$$E_{res} = 0,0173 M (5,624 - p_a)$$

$$C = h_c \cdot F_{cl} (\bar{t}_{sk} - \bar{t}_a)$$

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

$$w = E/E_{max}$$

$$r = 1 - w^2/2$$

$$h_c = 2,38 |\bar{t}_{sk} - \bar{t}_a|^{0,25} \text{ pour convection naturelle}$$

$$= 3,5 + 5,2 v_{ar} \text{ pour } v_{ar} < 1 \text{ ms}^{-1}$$

$$= 8,7 v_{ar}^{0,6} \text{ pour } v_{ar} > 1 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58)$$

$$h_r = (\sigma E_{sk} A_r / A_{du}) \frac{[(\bar{t}_{sk} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]}{(\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r)}$$

$$F_{cl} = \frac{1}{\left[(h_c + h_r) l_{cl} + \frac{1}{f_{cl}} \right]}$$

$$f_{cl} = 1 + 1,97 l_d$$

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

$$R_T = \frac{1}{(h_e \cdot F_{pd})}$$

$$h_e = 16,7 h_c$$

$$F_{pd} = \left\{ 1 + 2,22 h_c \left[\frac{l_d \left(1 + \frac{1}{f_{cl}} \right)}{h_c - h_r} \right] \right\}^{-1}$$

$\bar{t}_{sk} = 30,0 + 0,093 t_a + 0,045 t_r - 0,571 v_a + 0,254 p_a + 0,00128 M - 3,57 l_d$
 ou $\bar{t}_{sk} = 36 \text{ °C}$ pour une approximation ou si les valeurs dépassent les limites pour lesquelles l'équation a été établie.

Source: ISO, 1989b.

Les valeurs limites de la température humide et de globe noir ont permis d'indiquer à quel moment les recrues pouvaient s'entraîner. On a observé qu'en utilisant le WGTB, au lieu de ne considérer que la température de l'air, il était possible de réduire à la fois les accidents dus à la chaleur et le temps perdu du fait de l'interruption des entraînements à la chaleur. Cet indice a été adopté par le NIOSH (1972), par la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) (ACGIH, 1990) et

Tableau 42.9 • Définition des termes employés dans la norme ISO 7933

Symbole	Terme	Unités
A_r/A_{du}	fraction de la surface de la peau impliquée dans un échange thermique par rayonnement	ND
C	échange thermique sur la peau par convection	Wm^{-2}
C_{res}	déperdition de chaleur respiratoire par convection	Wm^{-2}
E	écoulement de chaleur par évaporation à la surface de la peau	Wm^{-2}
E_{max}	taux d'évaporation maximal pouvant être atteint lorsque la peau est complètement mouillée	Wm^{-2}
E_{req}	évaporation requise pour l'équilibre thermique	Wm^{-2}
E_{res}	déperdition de chaleur respiratoire par évaporation	Wm^{-2}
E_{sk}	pouvoir d'émission de la peau (0,97)	ND
F_{cl}	facteur de réduction d'échange thermique sensible dû aux vêtements	ND
F_{pcl}	facteur de réduction d'échange thermique latent	ND
f_{cl}	rapport entre superficie vêtue et non vêtue d'un sujet	ND
h_c	coefficient de transfert thermique par convection	$Wm^{-2}K^{-1}$
h_e	coefficient de transfert thermique par évaporation	$Wm^{-2}kPa^{-1}$
h_r	coefficient de transfert thermique par rayonnement	$Wm^{-2}K^{-1}$
l_{cl}	isolation thermique sèche fondamentale des vêtements	$m^2 KW^{-1}$
K	échange thermique sur la peau par conduction	Wm^{-2}
M	puissance métabolique	Wm^{-2}
P_a	pression partielle de vapeur	kPa
$P_{sk,s}$	pression de vapeur saturante à la température de la peau	kPa
R	échange thermique sur la peau par rayonnement	Wm^{-2}
R_T	résistance totale à l'évaporation de la couche limite de l'air et du vêtement	m^2kPaW^{-1}
r_{req}	rendement évaporatoire de la sudation pour le débit sudoral requis	ND
SW_{req}	débit sudoral requis pour l'équilibre thermique	Wm^{-2}
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$	$Wm^{-2}K^{-4}$
t_a	température de l'air	°C
t_r	température rayonnante moyenne	°C
\bar{t}_{sk}	température moyenne de la peau	°C
v_a	vitesse de l'air pour un sujet immobile	ms^{-1}
v_{ar}	vitesse relative de l'air	ms^{-1}
W	puissance mécanique	Wm^{-2}
w	humidité de la peau	ND
w_{req}	humidité requise pour la peau	ND

Source: ISO, 1989b.

ND = non dimensionnel.

par l'ISO (1989a), et il est toujours utilisé aujourd'hui. La norme ISO 7243 (ISO, 1989a), qui est fondée sur l'indice WGTB, fournit une méthode facile à utiliser dans un environnement chaud

pour un diagnostic «rapide». Elle donne la spécification des instruments de mesure et des valeurs limites de WBGT pour des sujets acclimatés et non acclimatés (voir tableau 42.6). Ainsi, pour une personne acclimatée, au repos et vêtue de 0,6 clo, la valeur limite est de 33 °C WBGT. Les limites recommandées par l'ISO (1989a) et par le NIOSH (1972) sont à peu près les mêmes. Pour le calcul de l'indice WBGT, voir V. «L'indice de température humide et de globe noir (WBGT)», dans l'encadré intitulé «Les indices de contrainte thermique: formules et définitions».

La simplicité de cet indice et le fait qu'il ait été adopté par des organismes influents font qu'il est largement accepté. Comme tous les indices directs, il a ses limites lorsqu'il est utilisé pour simuler une réponse humaine et la prudence s'impose dans ses applications pratiques. On peut se procurer dans le commerce des instruments portables pour la détermination de cet indice (par exemple, Olesen, 1985).

La limite physiologique d'exposition à la chaleur (Physiological Heat Exposure Limit (PHEL))

Dasler (1974, 1977) propose des valeurs limites de WBGT fondées sur une prévision de dépassement de deux des limites physiologiques quelles qu'elles soient (d'après des données expérimentales) d'astreinte non admissible. Ces limites sont données par l'équation suivante:

$$PHEL = (17,25 \times 10^8 - 12,97M \times 10^6 + 18,61M^2 \times 10^3) \times WBGT^{-5,36}$$

Cet indice utilise donc l'indice direct WBGT dans la zone commandée par l'environnement (voir figure 42.4), où peut se produire un stockage de chaleur.

L'indice de température de globe noir humide (Wet Globe Temperature (WGT))

La température d'un globe noir mouillé d'une taille appropriée peut être utilisée comme indice de contrainte thermique. On part du principe que cette température est influencée à la fois par le transfert de chaleur à sec et par évaporation, comme cela se produit chez un homme qui transpire, et que l'on peut donc, avec une certaine expérience, l'employer comme indice de contrainte thermique. Olesen (1985) décrit le WGT comme la température d'un globe noir de 63,5 mm (2,5 pouces) de diamètre recouvert d'un tissu noir humide. La température est relevée lorsque l'équilibre est atteint après approximativement 10 à 15 minutes d'exposition. Pour le NIOSH (1986), le Botsball (Botsford, 1971) est l'instrument le plus simple et le plus facile à lire. Il s'agit d'une sphère en cuivre de 76,2 mm (3 pouces) recouverte d'un tissu noir maintenu à une humidité de 100% grâce à un réservoir d'eau à alimentation automatique. L'élément détecteur d'un thermomètre est situé au centre de la sphère et la température est relevée sur un cadran à code de couleur.

La relation entre WGT et WBGT est exprimée par l'équation simple suivante:

$$WBGT = WGT + 2 \text{ °C}$$

dans des conditions de chaleur rayonnante et d'humidité modérées (NIOSH, 1986), mais il est évident que cette relation cesse d'être valable dans toute une série d'autres conditions.

L'indice d'Oxford

Lind (1957) a proposé un indice direct et simple pour une exposition à la chaleur limitée par le stockage de chaleur et basé sur la somme pondérée de la température mesurée au thermomètre humide ventilé (T_{wb}) et de la température mesurée au thermomètre sec (T_{db}):

$$WD = 0,85 T_{wb} + 0,15 T_{db}$$

Les temps d'exposition admissibles pour les équipes de secours dans les mines étaient basés sur cet indice. Il est d'application très générale, mais ne convient pas lorsque le rayonnement thermique est important.

Les pratiques de travail dans les environnements chauds

Le NIOSH (1986) donne une présentation très complète des pratiques de travail dans les environnements chauds, y compris les pratiques médicales de prévention. La norme ISO 12894 (ISO, 1993a) propose une surveillance médicale des sujets exposés à des environnements chauds ou froids. On devrait toujours se souvenir qu'il existe un droit humain fondamental, affirmé par la Déclaration d'Helsinki en 1985, selon lequel toute personne doit pouvoir quitter un environnement extrême sans avoir à donner d'explication. En cas d'exposition à un tel environnement, des pratiques de travail bien définies peuvent grandement améliorer la sécurité. Un principe raisonnable de l'ergonomie de l'environnement et de la santé au travail veut que, dans toute la mesure possible, tout élément de contrainte du milieu soit supprimé à la source. Le NIOSH (1986) subdivise les méthodes de contrôle en cinq types qui sont présentés au tableau 42.7.

L'armée a procédé à de nombreuses recherches sur les vêtements de protection dits NBC (nucléaire, biologique, chimie). Dans les environnements très chauds où il n'est pas possible de retirer ses vêtements, les méthodes de travail prennent toute leur importance. Un problème analogue se pose pour les travailleurs des centrales nucléaires. Il existe plusieurs moyens de les rafraîchir rapidement pour qu'ils puissent reprendre le travail; certaines consistent à mouiller à l'éponge la surface extérieure des vêtements avec de l'eau puis à insuffler de l'air sec dessus. D'autres comprennent des dispositifs actifs de refroidissement et diverses méthodes de refroidissement de certaines régions du corps. Le transfert de la technologie des vêtements militaires vers l'industrie est assez récent, mais on connaît déjà beaucoup de choses dans ce domaine et des pratiques de travail adaptées peuvent largement réduire le risque.

L'évaluation d'un environnement chaud par les normes ISO

L'exemple hypothétique suivant montre comment on peut utiliser les normes ISO pour évaluer des environnements chauds (Parsons, 1993):

Les travailleurs d'une aciérie exécutent leur travail en quatre phases. Ils endossent des vêtements de protection et exécutent pendant 1 heure un travail léger dans un environnement chaud à chaleur rayonnante. Ils se reposent ensuite pendant 1 heure, puis exécutent le même travail pendant 1 heure, à l'abri de la chaleur rayonnante. Enfin, ils exécutent pendant 30 minutes un travail impliquant un niveau modéré d'activité physique dans un environnement chaud par chaleur rayonnante.

La norme ISO 7243 (ISO, 1989a) propose une méthode simple de contrôle de l'environnement par l'indice WBGT. Si les niveaux de WBGT sont inférieurs aux valeurs de référence de WBGT données par cette norme, aucune autre action n'est requise. Si ces niveaux dépassent les valeurs de référence (voir tableau 42.6), il faut réduire la contrainte subie par les travailleurs. On y parvient en adaptant les systèmes de régulation et les méthodes de travail. On peut aussi procéder à une évaluation analytique selon la norme ISO 7933.

Les valeurs de WBGT relatives à ce travail figurent au tableau 42.10. Elles ont été mesurées selon les spécifications données par les normes ISO 7243 et ISO 7726. Les facteurs environnementaux et personnels relatifs aux quatre phases du travail figurent au tableau 42.11.

Tableau 42.10 • Valeurs WBGT (°C) pour 4 phases de travail

Phase de travail (minutes)	WBGT = WBGT _{cheville} + 2 WBGT _{abdomen} + WBGT _{tête}	Référence WBGT
0-60	25	30
60-90	23	33
90-150	23	30
150-180	30	28

Tableau 42.11 • Données de base de l'évaluation analytique selon la norme ISO 7933

Phase de travail (minutes)	t_a (°C)	t_i (°C)	P_a (Kpa)	v (ms ⁻¹)	clo (clo)	Act (Wm ⁻²)
0-60	30	50	3	0,15	0,6	100
60-90	30	30	3	0,05	0,6	58
90-150	30	30	3	0,20	0,6	100
150-180	30	60	3	0,30	1,0	150

Source: ISO, 1989b.

On constate que, pour une partie du travail, les valeurs de WBGT dépassent les valeurs de référence. La conclusion est qu'une analyse plus détaillée est nécessaire.

La méthode d'évaluation analytique proposée par la norme ISO 7933 a été réalisée en utilisant les données présentées au tableau 42.11 et le programme informatique annexé à cette norme. Le tableau 42.12 donne les résultats de cette évaluation en termes de niveau d'alarme pour des travailleurs acclimatés.

Une évaluation globale permet donc de prédire que des travailleurs non acclimatés, aptes pour le travail, pourraient effectuer un poste de 8 heures sans subir d'astreinte physiologique (thermique) inadmissible. Si une plus grande précision est nécessaire ou si chaque travailleur doit être évalué, les normes ISO 8996 (ISO, 1990) et ISO 9920 (ISO, 1995) donnent des informations détaillées sur la production de chaleur métabolique et l'isolement vestimentaire. La norme ISO 9886 présente des méthodes de mesure de l'astreinte physiologique chez les travailleurs et peut être appliquée pour concevoir et évaluer des environnements pour différents types de main-d'œuvre. Dans l'exemple considéré, la température moyenne de la peau, la température interne du corps, la fréquence cardiaque et la perte de masse seraient des données à considérer. La norme ISO 12894 (ISO, 1993a) fournit des directives sur le contrôle médical de ce type d'investigation.

● L'ÉCHANGE THERMIQUE À TRAVERS LES VÊTEMENTS

Wouter A. Lotens

Pour pouvoir survivre et travailler dans des conditions plus froides ou plus chaudes, il faut créer à la surface de la peau une certaine tiédeur grâce à des vêtements et à un système de chauffage ou de refroidissement artificiel. Il est nécessaire de bien comprendre les

Tableau 42.12 • Evaluation analytique selon la norme ISO 7933

Phase de travail (minutes)	Valeurs prévues			Durée limitée d'exposition (minutes)	Raison de la limite
	t_{sk} (°C)	w (ND)	SW (gh ⁻¹)		
0-60	35,5	0,93	553	423	Perte hydrique
60-90	34,6	0,30	83	480	Pas de limite
90-150	34,6	0,57	213	480	Pas de limite
150-180	35,7	1,00	566	45	Température du corps
Total	—	0,82	382	480	Pas de limite

Source: ISO, 1989b.

mécanismes de l'échange thermique à travers les vêtements pour concevoir des tenues de travail aussi adaptées que possible à un travail à des températures extrêmes.

Les mécanismes du transfert thermique à travers les vêtements

La capacité d'isolation thermique des vêtements

Le transfert thermique qui se fait à travers les vêtements, dépend inversement, l'isolation qui est assurée par les vêtements, dépend largement de l'air qui est piégé dans et sur ces vêtements. Sans entrer dans le détail, on entend par vêtement tout tissu qui offre une prise aux couches d'air. Cette définition n'est qu'approximative, car certaines des propriétés de ce tissu ont elles aussi leur importance, qu'il s'agisse de la constitution mécanique des fibres (par exemple, leur résistance au vent ou leur capacité de subir un tissage épais), ou de leurs propriétés intrinsèques (par exemple, leur capacité d'absorption et de réflexion du rayonnement thermique, d'absorption de la vapeur d'eau ou d'absorption de la sueur par effet de mèche). Pour des températures qui ne sont pas vraiment extrêmes, les avantages de différents types de fibres sont souvent surestimés.

Les couches d'air et le mouvement de l'air

L'idée selon laquelle c'est l'air et, en particulier, un air calme qui assure l'isolation, laisse à penser que plus les couches d'air sont épaisses, plus l'isolation sera bonne. Cela est vrai, mais il y a une limite physique à cette épaisseur. Les couches d'air se forment par un phénomène d'adhérence des molécules de gaz à toute surface, puis par la cohésion d'une deuxième couche de molécules sur la première, et ainsi de suite. Toutefois, les forces qui lient les couches les unes aux autres sont de plus en plus faibles à mesure qu'elles s'accumulent, de sorte que les molécules externes bougent au moindre souffle d'air. Dans un air calme, les couches d'air peuvent atteindre une épaisseur maximale de 12 mm, mais dès que l'air est brassé violemment, comme en cas de tempête, cette épaisseur peut diminuer jusqu'à moins de 1 mm. En général, il existe une relation entre l'épaisseur des couches et la racine carrée du déplacement de l'air (voir l'encadré intitulé «Les formules et les définitions»). La fonction exacte dépend de la dimension et de la forme de la surface.

Les formules et les définitions

Il y a en général une relation de racine carrée entre l'épaisseur d d'une couche d'air immobile et la vitesse de l'air v . La fonction exacte dépend de la dimension et de la forme de la surface, mais une approximation utile pour le corps humain est:

$$d = 0,0031 / \sqrt{v}$$

L'air immobile agit comme une couche isolante ayant une conductivité λ (constante de la matière, quelle que soit sa forme) de 0,026 W/mK, avec elle-même un coefficient de transfert thermique h (en W/m²K) (propriété conductrice d'une plaque de matière) de:

$$h = \lambda \cdot d = 8,3 \sqrt{v} \text{ (Kerslake, 1972).}$$

Le flux de chaleur rayonnante (ϕ_r) entre deux surfaces est plus ou moins proportionnel à leur différence de température:

$$\phi_r = 4 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^3 \Delta T$$

où T est la température absolue moyenne (en Kelvin) des deux surfaces, ϵ est le coefficient d'absorption et σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴). La quantité d'échange par rayonnement est inversement proportionnelle au nombre de couches interposées (n):

$$\phi_r = \phi_{r0} / (1+n)$$

L'isolation par les vêtements (l_{cl}) est définie par les équations suivantes:

$$l_{cl} = (T_{sk} - T_{cl}) / \phi_s$$

$$l_a = (T_{cl} - T_a) \cdot f_{cl} / \phi_s$$

$$l_t = l_{cl} + l_a / f_{cl}$$

où l_{cl} est l'isolation intrinsèque, l_a est l'isolation par l'air (adjacent), l_t est l'isolation totale, T_{sk} est la température moyenne de la peau, T_{cl} est la température moyenne de la surface extérieure des vêtements, T_a est

la température de l'air, ϕ_s est le flux de chaleur sèche, f_{cl} est le facteur de surface des vêtements. Ce coefficient a été sous-estimé dans les études anciennes, mais certaines, plus récentes, convergent vers l'expression $f_{cl} = 1 + 1,9 \cdot l_{cl}$.

Souvent l est exprimée par l'unité clo; un clo = 0,155 m²K/W.

McCullough et coll. (1985) ont établi une équation de régression à partir de données sur un échantillonnage de gammes de vêtements, en prenant comme déterminants l'épaisseur du textile (d_{abr} , en mm) et le pourcentage de la surface du corps recouverte (p_{bc}). Leur formule pour l'isolation de divers éléments de vêtements (l_{cl}) est:

$$l_{cl} = 0,0012 \cdot p_{bc} + 0,0002 \cdot p_{bc} \cdot d_{abr} - 0,012$$

La résistance à l'évaporation R (en s/m) peut être définie par:

$$R_{cl} = (C_{sk} - C_{cl}) / \dot{m}$$

$$\text{(ou parfois } R_e = (P_{sk} - P_{cl}) / \phi_e, \text{ en m}^2\text{Pa/W)}$$

$$R_{cl} = (d_{ens} + 0,001 \cdot n + 0,3 \cdot d_{cl}) / D$$

Pour les couches de tissu, l'équivalent air (d_{eq}) est l'épaisseur d'air qui fournit la même résistance à la diffusion que le tissu. Les écoulements de vapeur associée (\dot{m}) et de chaleur latente (ϕ_e) sont:

$$\dot{m} = D \cdot \Delta C / d_{eq} \text{ (en g/m}^2\text{s)}$$

$$\phi_e = H_e \cdot \dot{m} \text{ (en W/m}^2\text{)}$$

où D est le coefficient de diffusion (m²/s), C la concentration de vapeur (g/m³) et H_e la chaleur d'évaporation (2430 J/g).

$$d_{eq} = 0,001 + 1,3 \cdot d_{abr}$$

(d'après Lotens, 1993). d_{eq} est en relation avec R par:

$$d_{eq} = R \cdot D$$

où: D est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air, $2,5 \times 10^{-5}$ m²/s.

La conduction de la chaleur de l'air calme et de l'air en mouvement

L'air, s'il est calme, agit comme une couche isolante ayant une conductivité constante, quelle que soit la forme de la matière. La perturbation des couches d'air entraîne une perte de l'épaisseur effective; il s'agit des perturbations dues au vent, mais également aux mouvements de la personne qui porte le vêtement — ces déplacements du corps étant une composante du vent — et des mouvements des différentes parties du corps. A cela s'ajoute la convection naturelle. La figure 42.7 présente un diagramme de l'effet de la vitesse de l'air sur la capacité d'isolation d'une couche d'air.

Le transfert thermique par rayonnement

Le rayonnement est un autre mécanisme important du transfert thermique. Chaque surface émet de la chaleur et absorbe la chaleur émise par les autres surfaces. Le flux de la chaleur émise est plus au moins proportionnel à la différence de température entre les deux surfaces d'échange. Une couche de vêtements interposée entre ces deux surfaces gêne le transfert de la chaleur émise, en interceptant le flux énergétique; le vêtement atteint une température qui est plus ou moins égale à la moyenne de celle des deux surfaces, en réduisant la différence de température entre celles-ci; le flux de la chaleur émise est donc réduit d'un facteur deux. Plus on ajoute de couches, plus le taux du transfert thermique diminue.

Des couches multiples sont donc efficaces pour réduire le transfert de la chaleur émise. Dans les tissus ouatinés ou les molletons de fibres, le rayonnement est intercepté par les fibres entrelacées plutôt que par une couche de tissu. La densité de la matière fibreuse (ou plutôt la surface totale de la matière fibreuse par volume de tissu) est un paramètre essentiel pour le transfert du rayonnement à l'intérieur de ces molletons fibreux. Des fibres fines offrent plus de surface pour un poids donné que de grosses fibres.

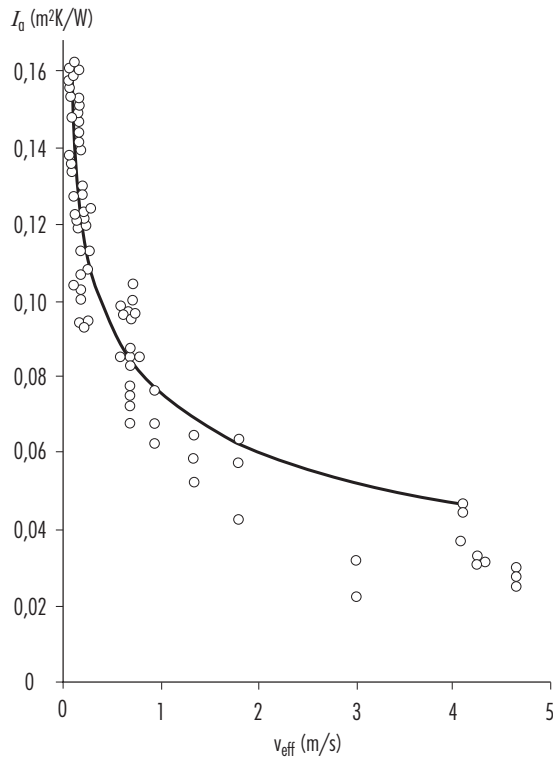
L'isolation par le tissu

Du fait des conductivités de l'air qui y est enfermé et du transfert par rayonnement, la conductivité d'un tissu est effectivement une constante pour des tissus de différentes épaisseurs et textures. L'isolation thermique est donc proportionnelle à l'épaisseur.

La résistance de l'air et des tissus à la vapeur

Les couches d'air créent aussi une résistance à la diffusion de la sueur qui s'évapore de la peau vers l'extérieur. Cette résistance est plus ou moins proportionnelle à l'épaisseur de l'ensemble des vêtements. Pour les tissus, la résistance à la vapeur dépend de l'air enfermé et de la densité du vêtement. En fait, pour les tissus, densité élevée et forte épaisseur ne vont jamais de pair. En raison de cette limitation, il est possible d'estimer l'équivalent air des tissus qui ne contiennent ni films ni enduits (voir figure 42.8). Les tissus enduits ou les tissus laminés en films peuvent avoir une

Figure 42.7 • Effet de la vitesse de l'air sur la capacité d'isolation d'une couche d'air



résistance imprévisible à l'écoulement de la vapeur, qui devra être déterminée par une mesure.

Du tissu et des couches d'air au vêtement

Les tissus à couches multiples

De ces mécanismes de transfert thermique, on peut tirer plusieurs conclusions importantes, à savoir qu'un vêtement très isolant est forcément épais, que des vêtements à couches minces multiples permettent d'obtenir une très bonne isolation, qu'un vêtement ample isole mieux qu'un vêtement serré et qu'il y a une limite à la capacité d'isolation qui est fonction de la couche d'air adhérant à la peau.

Dans le cas des vêtements conçus pour le froid, il est souvent difficile d'obtenir de l'épaisseur uniquement en utilisant des tissus minces. Une solution consiste à créer des tissus épais en montant ensemble deux tissus minces pour former l'enveloppe d'un ouatage. Le but du ouatage est de créer la couche d'air et de faire que l'air y soit aussi calme que possible à l'intérieur. Les tissus épais ont aussi un inconvénient: plus il y a de couches assemblées, plus le vêtement devient rigide et gêne le mouvement.

La diversité des vêtements

La capacité d'isolation des divers types de vêtements dépend largement de leur conception. Plusieurs paramètres de cette conception ont un effet sur l'isolation, à savoir le nombre de couches, les ouvertures, la coupe, la répartition de l'isolation sur le corps et la surface de peau exposée. Certaines caractéristiques du tissu telles que sa perméabilité à l'air, sa réflectivité et les produits dont il est enduit ont également leur importance. Par ailleurs, le vent et

l'activité physique modifient cette isolation. Est-il possible de donner une description des vêtements qui soit suffisamment précise pour prévoir quels en seront le confort et la tolérance de celui qui les porte? Plusieurs tentatives ont été faites selon différentes techniques. La plupart des évaluations de l'isolation d'un ensemble complet ont été faites pour des conditions statiques (pas de mouvement, pas de vent), pour des tenues d'intérieur et à partir de données obtenues sur des mannequins thermiques (McCullough, Jones et Huck, 1985). Faire les mêmes mesures sur des sujets humains est difficile et les résultats sont souvent très différents. Des mannequins mobiles, fiables, ont été mis au point et sont utilisés depuis le milieu des années quatre-vingt (Olesen et coll., 1982; Nielsen, Olesen et Fanger, 1985). De même, l'amélioration des techniques de mesurage a aussi facilité les expériences sur l'être humain. La prise en compte de l'évaporation de la sueur dans ce type d'évaluation reste un problème encore mal résolu. Les mannequins qui transpirent sont rares et aucun n'offre une répartition réaliste du taux de sudation sur le corps. Les êtres humains transpirent de manière réaliste, c'est-à-dire pas toujours de la même manière partout.

La définition de l'isolation par les vêtements

L'isolation par les vêtements (I_{cl} en unités de m^2K/W) à l'état d'équilibre, sans source de rayonnement ni de condensation dans le vêtement, est définie dans l'encadré intitulé «Les formules et les définitions». Souvent I est exprimé en unité clo (qui n'est pas une unité internationale standard). Un clo est égal à $0,155 m^2K/W$. On part du principe que l'unité clo se rapporte à tout le corps et qu'elle inclut donc le transfert thermique par les parties exposées du corps.

Figure 42.8 • Relation entre épaisseur et résistance à la vapeur d'eau (d_{eq}) de tissus sans enduits

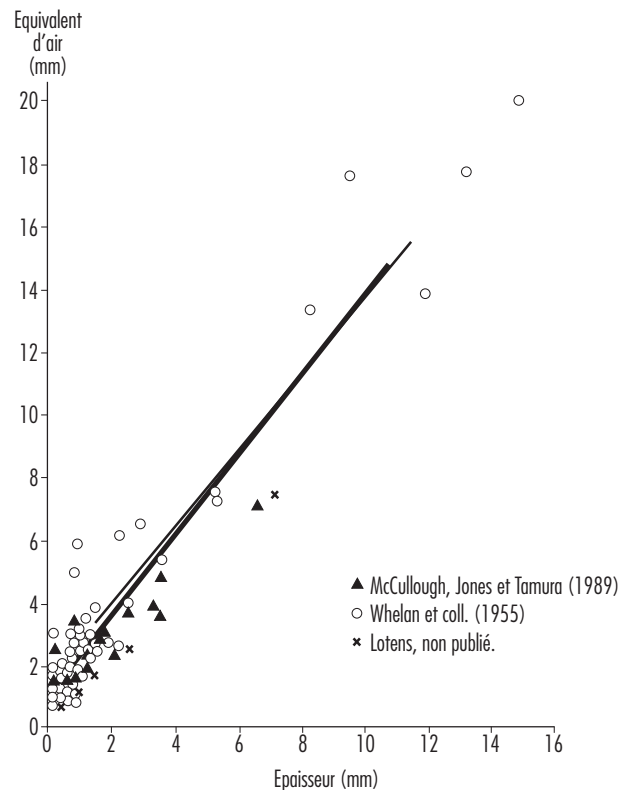
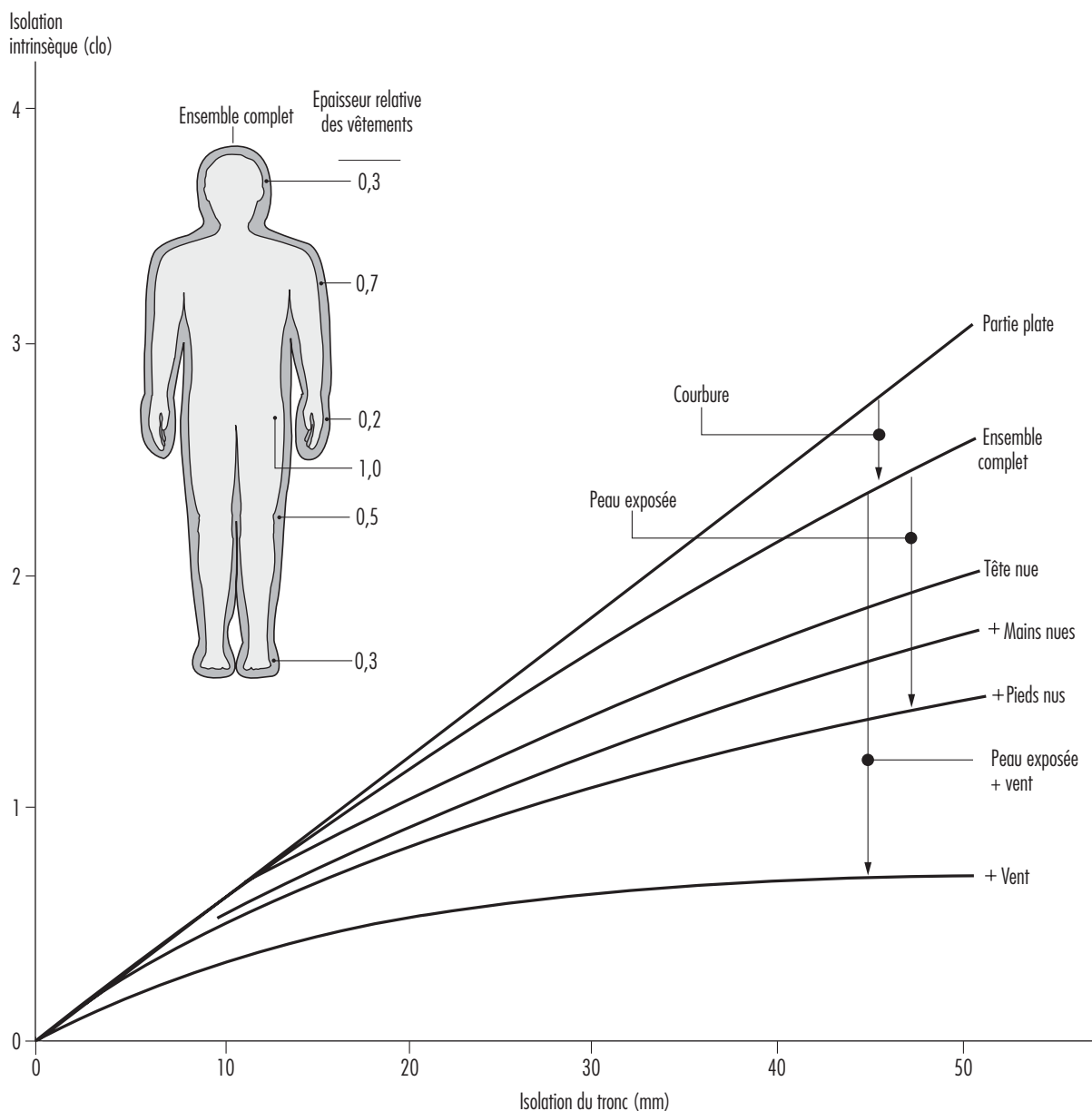


Figure 42.9 • Isolation intrinsèque en fonction des courbures du corps, des zones de peau découvertes et de la vitesse du vent



I est modifié par le mouvement et par le vent, comme on l'a vu précédemment, et la donnée corrigée est désignée sous le terme d'*isolation résultante*. Il s'agit d'un terme qui est fréquemment employé, mais qui n'est pas admis partout.

La répartition des vêtements sur le corps

La totalité du transfert thermique qui se fait à partir du corps comprend la chaleur qui est transférée par la peau exposée (généralement la tête et les mains) et la chaleur qui passe à travers les vêtements. L'*isolation intrinsèque* (voir l'encadré intitulé «Les formules et les définitions») est calculée sur toute la surface de la peau, pas seulement sur la partie couverte. La peau exposée transfère plus de chaleur que la peau couverte et a donc une grande influence sur l'isolation intrinsèque. Cet effet s'accroît avec la

vitesse du vent. La figure 42.9 montre comment l'isolation intrinsèque diminue progressivement selon la courbure des formes du corps (les couches extérieures sont moins efficaces que les couches intérieures), selon les parties qui sont exposées (voie supplémentaire de transfert thermique) et selon l'accroissement de la vitesse du vent (moindre isolation, notamment pour la peau exposée) (Lotens, 1989). Pour les ensembles épais, cette réduction de l'isolation est considérable.

L'épaisseur et le degré de recouvrement d'un ensemble de vêtements

De toute évidence, l'épaisseur de l'isolation et le degré de recouvrement de la peau sont d'importants déterminants de la déperdition de chaleur. En réalité, ces deux éléments sont corrélés, car un

vêtement d'hiver est non seulement plus épais, mais recouvre une plus grande partie du corps qu'un vêtement d'été.

La figure 42.10 montre de quelle manière l'association de ces effets donne une relation pratiquement linéaire entre l'épaisseur du vêtement (exprimée en volume de tissu isolant par unité de surface du vêtement) et son isolation (Lotens, 1989). Sa limite inférieure est déterminée par l'isolation fournie par l'air adjacent et sa limite supérieure par la capacité d'utiliser le vêtement. Une répartition uniforme est sans doute la meilleure isolation au froid, mais il est peu pratique de porter des vêtements lourds et encombrants sur les membres. C'est pourquoi les vêtements sont surtout portés sur le tronc et la sensibilité des régions de la peau s'y adapte. Les membres jouent un grand rôle dans la régulation de l'équilibre thermique humain et une isolation élevée des membres limite l'efficacité de cette régulation.

La ventilation des vêtements

Les couches d'air qui sont piégées dans les vêtements sont soumises à l'effet du mouvement et du vent, mais à un degré différent de celui que subit la couche d'air superficielle. Le vent crée une ventilation dans le vêtement par l'air qui pénètre dans le tissu et traverse les ouvertures, tandis que le mouvement en accroît la circulation interne. Havenith, Heus et Lotens (1990) ont constaté que le mouvement est un facteur plus important à l'intérieur du vêtement que dans la couche d'air superficielle. Toutefois, cette conclusion dépend de la perméabilité du tissu à l'air. La ventilation par le vent est très forte dans le cas des tissus très perméables à l'air. Lotens (1993) a montré que cette ventilation peut s'exprimer en tant que fonction de la vitesse effective du vent et de la perméabilité à l'air.

Estimations de la capacité d'isolation des vêtements et de leur résistance à la vapeur d'eau

Isolement des vêtements selon les caractéristiques physiques

L'épaisseur des vêtements considérés donne déjà une première idée de leur capacité d'isolation. En général, un vêtement a une conductivité de 0,08 W/mK. Pour une épaisseur moyenne de 20 mm, cela donne un I_{cl} de 0,25 m²K/W ou 1,6 clo. Cependant, les pièces de coupe ample, comme les pantalons ou les manches, ont une conductivité beaucoup plus élevée, de l'ordre de 0,15, tandis que plusieurs couches de vêtements très serrés ont une conductivité de 0,04, les fameux 4 clo par pouce rapportés par Burton et Edholm (1955).

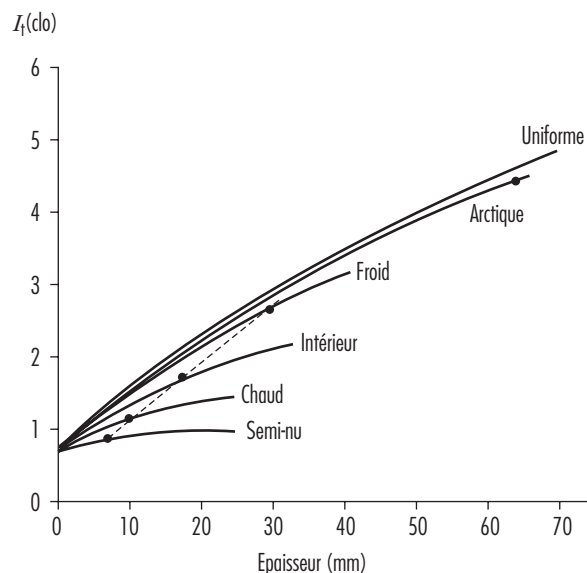
Les estimations d'après des tables

D'autres méthodes consistent à utiliser des valeurs fournies par des tables établies pour les divers éléments qui composent l'habillement. Ces éléments ont fait préalablement l'objet de mesures sur mannequin. L'ensemble étudié est divisé en ses divers composants, que l'on recherche ensuite dans la table. Si l'on se trompe sur le choix de l'article le plus similaire figurant dans la table, on risque des erreurs. Les valeurs de l'isolement de chaque élément sont mises en équation pour être sommées (McCullough, Jones et Huck, 1985) et obtenir l'isolation intrinsèque à l'ensemble considéré.

Le facteur de surface des vêtements

Pour calculer l'isolation totale, on estime f_{cl} (voir l'encadré intitulé «Les formules et les définitions»). Un moyen expérimental pratique d'effectuer cette estimation consiste à mesurer la surface du vêtement, à apporter les corrections nécessaires pour les parties qui se recouvrent et à diviser cette surface par la surface totale de la peau (DuBois et DuBois, 1916). Plusieurs estimations tirées de diverses études montrent que f_{cl} augmente de façon linéaire avec l'isolation intrinsèque.

Figure 42.10 • Isolation totale résultant de l'épaisseur des vêtements et de leur répartition sur le corps



L'estimation de la résistance à la vapeur d'eau

Pour un ensemble de vêtements, la résistance à la vapeur d'eau est la somme de la résistance des couches d'air et des couches de vêtements. En général, le nombre de couches varie selon les parties du corps et la meilleure façon de l'évaluer est de faire la moyenne pondérée par la surface, y compris celle de la peau nue.

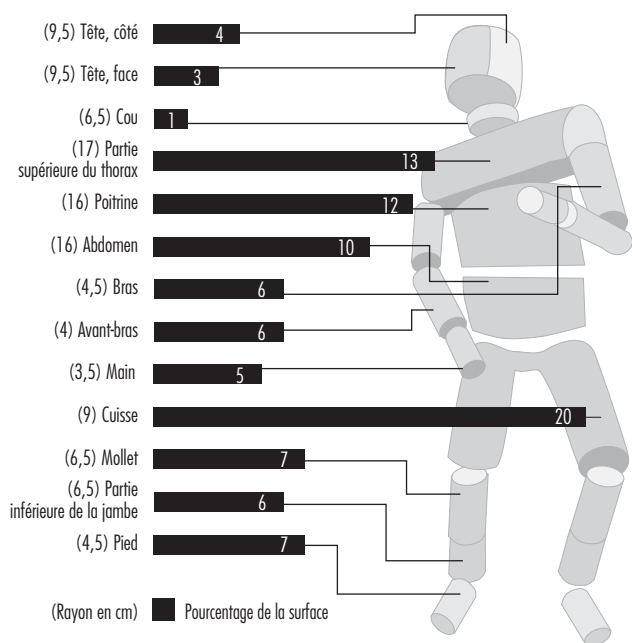
La résistance relative à la vapeur d'eau

La résistance à l'évaporation est moins fréquemment adoptée que I , parce qu'il existe peu de mesures de C_{cl} (ou P_{cl}). Woodcock (1962) a étudié le problème en définissant l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau i_m comme étant le rapport entre I et R , comparé au même rapport pour une seule couche d'air (ce dernier rapport est presque une constante appelée constante psychométrique S , 0,0165 K/Pa, 2,34 Km³/g ou 2,2 K/torr); $i_m = I/(R \cdot S)$. Les valeurs typiques de i_m pour un vêtement non enduit, déterminées sur des mannequins, sont de 0,3 à 0,4 (McCullough, Jones et Tamura, 1989). Les valeurs de i_m pour des stratifiés de tissus et leur air adjacent peuvent être mesurées de manière relativement simple sur un appareil à plaque chaude mouillée, mais cette valeur dépend en réalité du flux d'air circulant au-dessus de l'appareil et de la réflectivité de la salle dans laquelle il est installé. On a parfois tenté d'extrapoler le rapport de R à I pour des êtres humains vêtus (DIN, 1992) à partir des mesures effectuées sur des tissus, mais cette extrapolation est techniquement complexe. L'une des raisons en est que R n'est proportionnel qu'à la partie convection de I , si bien qu'il faut apporter de minutieuses corrections pour ce qui concerne le transfert de la chaleur rayonnante. Une autre raison est que l'air peut être différemment piégé selon les composants du tissu et selon les ensembles de vêtements. En fait, il est préférable de traiter séparément la diffusion de la vapeur d'eau et le transfert thermique.

Les estimations par des modèles articulés

Il existe des modèles plus perfectionnés que les méthodes exposées précédemment pour calculer l'isolation et la résistance à la vapeur d'eau. Ces modèles calculent la capacité d'isolation d'après les lois de la physique pour certaines parties du corps bien précises et

Figure 42.11 • Approximation de la forme humaine en cylindres



intègrent ces calculs dans l'isolation intrinsèque pour l'ensemble du corps humain. A cet effet, on simule la forme humaine grâce à une série de cylindres (voir figure 42.11). Le modèle de McCullough, Jones et Tamura (1989) nécessite des données sur les vêtements constituant toutes les couches de l'ensemble, et cela, pour chaque partie du corps. Le modèle dit de CLOMAN établi par Lotens et Havenith (1991) exige un moins grand nombre de valeurs de base. Ces modèles ont plus ou moins la même précision, qui est elle-même meilleure que celle des autres méthodes mentionnées, à l'exception de la détermination expérimentale. Ces modèles sont malheureusement et inévitablement plus complexes qu'on ne le voudrait pour une norme de portée aussi générale.

L'effet de l'activité et du vent

Lotens et Havenith (1991) proposent aussi certaines modifications aux données fournies par la littérature en ce qui concerne l'isolement et la résistance à la vapeur du fait de l'activité et du vent. L'isolement est plus faible en position assise qu'en station debout et cet effet est plus important dans le cas des vêtements très isolants. Cependant, les mouvements, selon leur vigueur, diminuent davantage l'isolement que ne le fait la posture. Pendant la marche, les bras et les jambes bougent et cette diminution est plus importante que sur une bicyclette, où seules les jambes sont en mouvement. Dans ce cas également, la diminution est plus forte pour les ensembles en vêtements épais. Le vent diminue l'isolement beaucoup plus pour un vêtement léger que pour un vêtement lourd. Cet effet dépend sans doute de la perméabilité à l'air du tissu constituant l'enveloppe du vêtement, qui est généralement plus faible pour les vêtements conçus pour le froid.

La figure 42.12 présente certains effets caractéristiques du vent et du mouvement sur la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau des vêtements de pluie. D'une façon générale, les auteurs semblent encore partagés sur l'importance des effets du mouvement ou du vent. Il paraît utile de rappeler à cet égard que certaines normes, comme la norme ISO 7730 (ISO, 1994), exi-

gent que l'on prenne en considération l'isolement résultant en tant que valeur de référence lorsqu'on a affaire à des personnes actives ou à des personnes exposées à un fort mouvement d'air. C'est dire qu'il s'agit là d'une question importante, souvent sous-estimée.

Comment traiter l'humidité

Les effets de l'absorption d'humidité

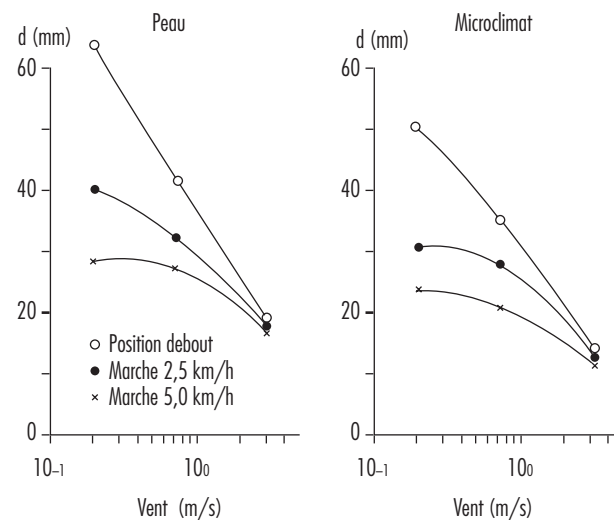
Quand des tissus ont la capacité d'absorber la vapeur d'eau, comme l'ont la plupart des fibres naturelles, le vêtement joue le rôle de condensateur de la vapeur, ce qui modifie le transfert thermique durant les passages d'un environnement à un autre. Lorsqu'une personne vêtue d'un vêtement non absorbant passe d'un milieu sec à un milieu humide, la sudation diminue brutalement. Dans un vêtement hygroscopique, le tissu absorbe la vapeur et le phénomène d'évaporation ne change que progressivement. En même temps, le processus d'absorption dégage de la chaleur dans le tissu, augmentant ainsi sa température. Il en résulte une réduction du transfert de la chaleur sèche émise par la peau. A première vue, les deux effets s'annulent, de sorte que le transfert thermique total reste inchangé. La différence avec un vêtement non hygroscopique est que la variation de l'évaporation cutanée est plus progressive avec moins de risque d'accumulation de sueur.

La capacité d'absorption de la vapeur

La capacité d'absorption d'un tissu dépend du type des fibres dont il est constitué et de la masse de ce tissu. La masse absorbée est plus ou moins proportionnelle à l'humidité relative, mais augmente au-delà de 90%. La capacité d'absorption (appelée *reprise d'humidité*) s'exprime en tant que quantité de vapeur d'eau absorbée dans 100 g de fibre sèche à l'humidité relative de 65%. Les tissus peuvent être classés de la manière suivante:

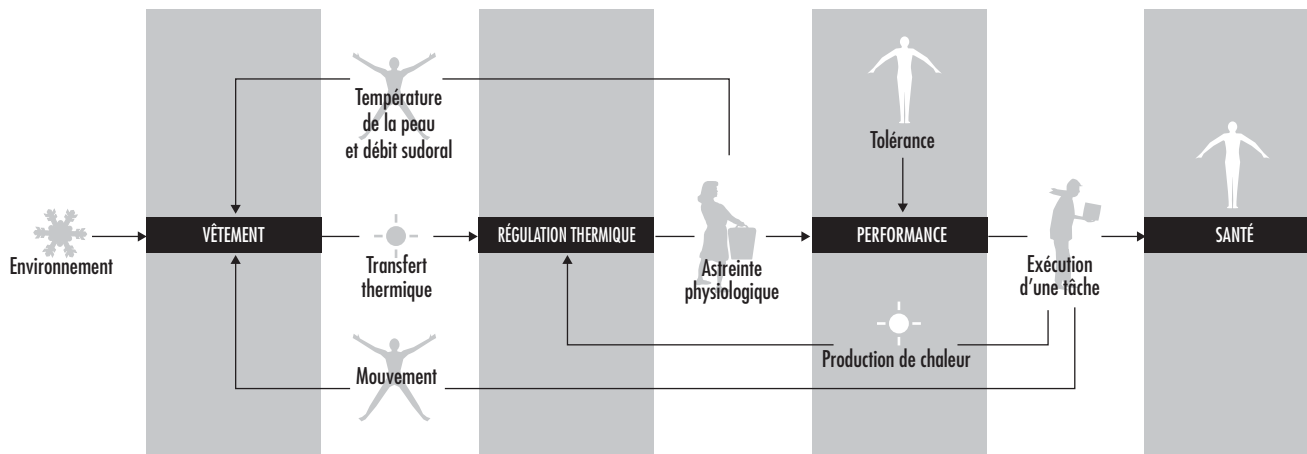
- *tissus faiblement absorbants* — acrylique, polyester (1 à 2 g par 100 g);
- *tissus moyennement absorbants* — Nylon, coton, acétate (6 à 9 g par 100 g);
- *tissus fortement absorbants* — soie, lin, chanvre, rayonne, jute, laine (11 à 15 g par 100 g).

Figure 42.12 • Diminution de la résistance à la vapeur d'eau en présence de vent et à la marche pour divers vêtements de pluie



42. LA CHALEUR ET LE FROID

Figure 42.13 • Présentation générale d'un modèle thermique dynamique



La rétention de l'eau

La rétention de l'eau dans les tissus, que l'on confond souvent avec l'absorption de la vapeur, obéit à des règles différentes. L'eau libre est faiblement liée au tissu et diffuse le long des capillaires. C'est l'effet de mèche. Le transfert de liquide d'une couche à l'autre se produit uniquement dans les tissus humides et sous pression hydrostatique. Un vêtement peut être mouillé par de la sueur non évaporée (superflue) venant de la peau. La teneur en eau du tissu peut être élevée et son évaporation peut alors menacer l'équilibre thermique. C'est ce qui se produit généralement durant le repos après un travail de force et ce peut être une cause de *refroidissement*. L'aptitude d'un tissu à retenir un liquide vient plus de sa constitution que de la capacité d'absorption des fibres et, dans la pratique, elle est généralement suffisante pour absorber toute la sueur superflue.

La condensation

Un vêtement peut être mouillé par la condensation de la sueur évaporée sur une couche donnée. Il y a condensation lorsque l'humidité est plus élevée que ne le permet la température ambiante. Par temps froid, c'est souvent le cas sur la face interne du tissu extérieur, et même dans des couches plus profondes lorsque le froid est extrême. En cas de condensation, l'humidité s'accumule, mais la température s'élève, comme elle le fait durant l'absorption. Toutefois, la différence entre condensation et absorption tient à ce que l'absorption est un phénomène temporaire, alors que la condensation peut se poursuivre pendant très longtemps. Le transfert de la chaleur latente durant la condensation peut fortement contribuer à la déperdition de chaleur, ce qui peut être souhaitable ou non. La plupart du temps, cette accumulation d'humidité est un inconvénient, à cause de l'inconfort et du risque de refroidissement qu'elle peut entraîner. Si la condensation est abondante, le liquide peut revenir à la peau pour s'évaporer à nouveau. Ce cycle fonctionne comme une pompe à chaleur et peut fortement réduire l'isolation du sous-vêtement.

Les simulations dynamiques

Depuis le début du siècle, toute une série de normes et d'indices ont été élaborés pour classer les vêtements et les climats. A quelques exceptions près, ils considèrent tous des états d'équilibre — c'est-à-dire des conditions dans lesquelles le climat et le travail durent suffisamment longtemps pour qu'un sujet atteigne une température corporelle stable. Ce type de travaux est rare actuellement grâce à l'amélioration des conditions d'hygiène et de tra-

vail. On s'intéresse davantage aujourd'hui à des expositions de courte durée, à des conditions de travail très pénibles, souvent liées à la gestion de catastrophes exigeant le port de vêtements de protection.

Ce qu'il faut donc actuellement, ce sont des simulations dynamiques impliquant un transfert thermique par les vêtements et une contrainte thermique pour celui qui les porte (Gagge, Fobelets et Berglund, 1986). Ces simulations peuvent être effectuées grâce à des modèles informatiques dynamiques se déroulant selon un scénario préétabli. L'un des modèles les plus perfectionnés actuels pour les vêtements est le modèle THDYN (Lotens, 1993), qui permet d'intégrer une large gamme de spécifications des vêtements et qui peut être personnalisé de manière à inclure les caractéristiques individuelles de la personne étudiée (voir figure 42.13). D'autres modèles sont à l'étude. Mais une évaluation expérimentale prolongée n'en reste pas moins nécessaire et le traitement de ces modèles est l'affaire d'experts, non de l'amateur éclairé. Ces simulations dynamiques qui se basent sur la physique du transfert de la chaleur et de la masse incluent tous les mécanismes du transfert thermique et leurs interactions — absorption de l'eau, chaleur de sources radiantes, condensation, ventilation, accumulation d'humidité, etc. — pour toute une gamme de vêtements, qu'il s'agisse de vêtements civils, de vêtements de travail ou de vêtements de protection.

LES ENVIRONNEMENTS FROIDS ET LE TRAVAIL AU FROID

Ingvar Holmér, Per-Ola Granberg et Göran Dahlström

On entend par environnement froid tout environnement qui provoque une déperdition de chaleur corporelle supérieure à la normale. Dans ce contexte, le terme «normal» fait référence aux conditions de confort dans lesquelles nous vivons généralement, mais celles-ci peuvent varier en fonction de critères sociaux, économiques ou climatiques. Pour les besoins de cet article, on considère comme froid tout environnement où la température de l'air est inférieure à 18 ou 20 °C.

Le travail au froid englobe toute une série d'activités industrielles ou professionnelles s'effectuant dans différentes conditions climatiques (voir tableau 42.23, p. 55). Dans la plupart des pays,

l'industrie de l'alimentation impose le travail dans des environnements froids, en général de 0 à 2 °C pour les aliments frais, et au-dessous de -25 °C pour les aliments surgelés. Dans ces locaux où le froid est artificiel, les conditions de température sont relativement bien définies, et l'exposition au froid est à peu près la même d'un jour à l'autre.

Dans de nombreux pays, les variations climatiques saisonnières sont telles que tout travail ayant lieu en plein air ou dans des bâtiments non chauffés, pendant des périodes plus ou moins longues, doit s'effectuer dans le froid. Cette exposition au froid peut varier considérablement selon la localisation géographique et selon le type de travail (voir tableau 42.23). L'eau froide représente un autre risque auquel sont confrontés les gens qui travaillent en mer, par exemple. Cet article traite des réactions à la contrainte thermique froide et des mesures de prévention à prendre pour y faire face. Les méthodes d'évaluation de cette contrainte thermique, ainsi que les limites de température acceptables fixées par les normes internationales les plus récentes sont décrites dans d'autres articles du présent chapitre.

La contrainte thermique froide et le travail dans le froid

La contrainte thermique froide peut prendre diverses formes selon que le froid affecte l'équilibre thermique général du corps ou, de manière plus localisée, celui des extrémités, de la peau et des poumons. Le type et la nature des différentes pathologies dues au froid sont décrits très en détail ailleurs dans ce chapitre. Le moyen le plus naturel de prévenir ces pathologies consiste à modifier son comportement et, en particulier, à changer et à adapter ses vêtements. Une protection suffisante empêche le refroidissement. Cependant, la protection peut, en elle-même, provoquer des effets pervers indésirables. La figure 42.14 illustre ce problème.

Le refroidissement de l'ensemble du corps ou de certaines de ses parties entraîne une sensation d'inconfort, une diminution de la sensibilité et des fonctions neuromusculaires et, finalement, des lésions liées au froid. L'inconfort dû au froid nous pousse à prendre diverses mesures pour limiter, voire supprimer cet inconfort. Lorsque, pour empêcher le refroidissement, on fait porter au travailleur des vêtements, des chaussures, des gants et des bonnets de protection, on limite sa mobilité et sa dextérité. La protection a un prix, en ce sens que gestes et mouvements sont gênés et on devient plus fatigués. La nécessité d'adapter constamment cet équipement pour conserver un bon niveau de protection demande attention et discernement et peut réduire la vigilance ou augmenter le temps de réaction. L'un des objectifs les plus importants de la recherche ergonomique est d'améliorer la fonctionnalité des vêtements tout en conservant une bonne protection contre le froid.

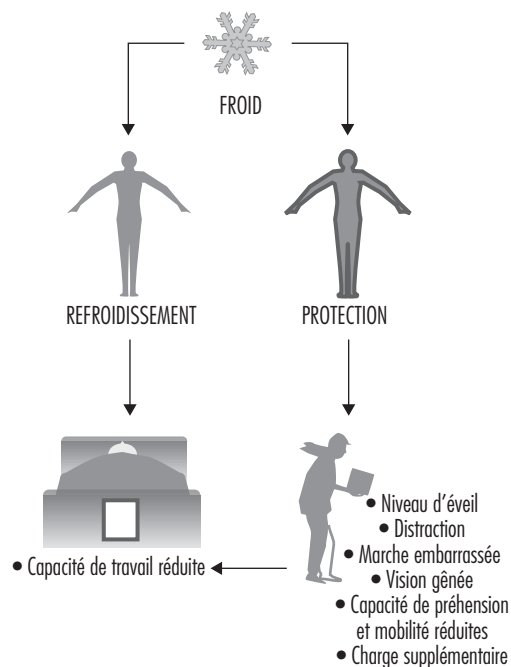
C'est pourquoi les effets du travail dans le froid sont divisés en deux catégories :

- les effets du refroidissement des tissus;
- les effets des mesures de protection («le prix de la protection»).

Lors de l'exposition au froid, les mesures comportementales réduisent les effets du refroidissement et, le cas échéant, suffisent à conserver l'équilibre thermique et un confort normal. Lorsque ces mesures sont insuffisantes, il se produit des réactions de thermorégulation et de compensation physiologiques (vasoconstriction, frissons). C'est l'action combinée de ces adaptations comportementales et physiologiques qui détermine l'effet final d'une contrainte thermique froide.

Ces effets seront décrits dans les paragraphes qui suivent. Ils sont classés en trois catégories: les effets aigus et passagers (qui se manifestent en quelques minutes ou en quelques heures), les effets de longue durée (qui durent plusieurs jours ou même plusieurs années) et les autres effets (qui ne sont pas liés directement aux réactions de

Figure 42.14 • Exemples des effets du froid



refroidissement proprement dit). Le tableau 42.13 présente des exemples de réactions associées à la durée de l'exposition au froid. Naturellement, les types de réaction et leur importance dépendent dans une large mesure du niveau de la contrainte thermique. Cependant, les longues expositions au froid (plusieurs jours ou davantage) impliquent rarement les niveaux extrêmes qui peuvent être atteints pendant une courte durée.

Les effets aigus et passagers du refroidissement

L'effet le plus évident et le plus direct d'une contrainte thermique froide est le refroidissement immédiat de la peau et des voies respiratoires supérieures. Les récepteurs thermiques réagissent et une série de réactions thermorégulatrices s'enclenche. Le type et l'amplitude des réactions sont essentiellement fonction du type et de la gravité du refroidissement. Comme on l'a vu plus haut, la vasoconstriction périphérique et les frissons sont les principaux mécanismes de défense. Ces deux réactions contribuent à préserver la chaleur du corps et sa température, mais compromettent les fonctions cardio-vasculaires et neuromusculaires.

Cependant, les effets psychologiques de l'exposition au froid modifient également les réactions physiologiques d'une manière complexe que l'on connaît encore mal. Un environnement froid suscite la distraction en ce sens qu'il réclame un effort mental accru pour affronter les nouveaux facteurs de contrainte (éviter le refroidissement, prendre des mesures de protection, etc.). En revanche, le froid «réveille» dans la mesure où l'augmentation de la contrainte accroît l'activité sympathique et, par-là, la préparation à l'action. Dans des conditions normales, les gens n'utilisent qu'une partie infime de leurs capacités et en conservent donc une réserve importante pour faire face à des circonstances imprévues ou difficiles.

La perception du froid et le confort thermique

La plupart des êtres humains connaissent une sensation de neutralité thermique à une température ambiante comprise entre 20 et 26 °C, quand ils pratiquent un travail sédentaire et peu fatigant

Tableau 42.13 • Durée des contraintes froides non compensées et réactions associées

Durée	Effets physiologiques	Effets psychologiques
Secondes	Hoquet inspiratoire Hyperventilation Élévation du rythme cardiaque Vasoconstriction périphérique Augmentation de la pression artérielle	Sensation cutanée, inconfort
Minutes	Refroidissement des tissus Refroidissement des extrémités Détérioration neuromusculaire Frissons Gelure par contact et par convection	Baisse des performances Douleur due au refroidissement localisé
Heures	Diminution de la capacité de travail physique Hypothermie Lésions dues au froid	Diminution des facultés mentales
Jours /mois	Lésions dues au froid sans gelure Acclimatement	Accoutumance Diminution de l'inconfort
Années	Effets chroniques sur les tissus	

physiquement (travail de bureau à 70 W/m²) dans des vêtements appropriés (isolement entre 0,6 et 1,0 clo). Dans ces conditions et en l'absence de déséquilibres thermiques tels que les courants d'air, ils ressentent un bon confort thermique. Ces conditions sont bien documentées et précisées par des normes telles que la norme ISO 7730 (ISO, 1994) (voir chapitre n° 45, «La régulation des environnements intérieurs», de la présente *Encyclopédie*).

La perception humaine du refroidissement est étroitement liée à l'équilibre thermique de l'ensemble du corps, ainsi qu'à l'équilibre thermique local. L'inconfort thermique dû au froid apparaît lorsque l'équilibre thermique du corps ne peut pas être maintenu en raison d'une inadéquation entre l'activité (production métabolique de chaleur) et les vêtements. Pour des températures comprises entre + 10 et + 30 °C, on peut prévoir l'amplitude de «l'inconfort dû au froid» d'une population grâce à l'équation de confort de Fanger, décrite dans la norme ISO 7730.

La formule suivante, simplifiée et raisonnablement précise, permet de calculer la température de neutralité (*t*) pour une personne standard:

$$t = 33,5 - 3 \cdot I_{cl} - (0,08 + 0,05 I_{cl}) \cdot M$$

M étant la chaleur métabolique estimée en W/m² et *I_{cl}* la valeur d'isolement des vêtements mesurée en clo.

A + 10 °C, l'isolement requis des vêtements (valeur clo) est supérieur à celui qui est calculé par la méthode IREQ (valeur d'isolement requise calculée) (norme ISO 11079) (ISO, 1993b). Cet écart tient à ce que des critères de «confort» différents sont utilisés dans ces deux méthodes. La norme ISO 7730 (ISO, 1994) met l'accent sur le confort thermique et permet une sudation très importante, tandis que la norme ISO 11079 (ISO, 1993b) ne considère qu'une sudation «contrôlée» à un niveau minimal, une nécessité dans le froid. La figure 42.15 décrit le rapport entre l'isolement vestimentaire, le niveau d'activité (production de chaleur) et la température de l'air, suivant l'équation ci-dessus et la méthode IREQ. Les zones grisées représentent les variations du niveau d'isolement requis en fonction des niveaux de «confort».

Les données présentées à la figure 42.15 ne sont qu'un guide pour l'établissement de conditions thermiques optimales, sous abri. La perception du confort ou de l'inconfort thermique varie considérablement suivant les individus. Ces variations tiennent aux niveaux d'activité et à la façon de se vêtir, mais aussi à des préférences subjectives et à l'acclimatement.

C'est ainsi, en particulier, que des gens qui n'ont qu'une activité sédentaire très légère deviennent de plus en plus sensibles au refroidissement localisé lorsque la température de l'air descend au-dessous de 20 ou de 22 °C. Dans ces conditions, il faut que la vitesse de déplacement de l'air reste faible (inférieure à 0,2 m/s) et que des vêtements isolants supplémentaires couvrent les parties sensibles du corps (la tête, le cou, le dos et les chevilles, par exemple). Le travail assis à des températures inférieures à 20 °C nécessite un siège et un dossier isolants pour limiter le refroidissement localisé dû à la compression des vêtements.

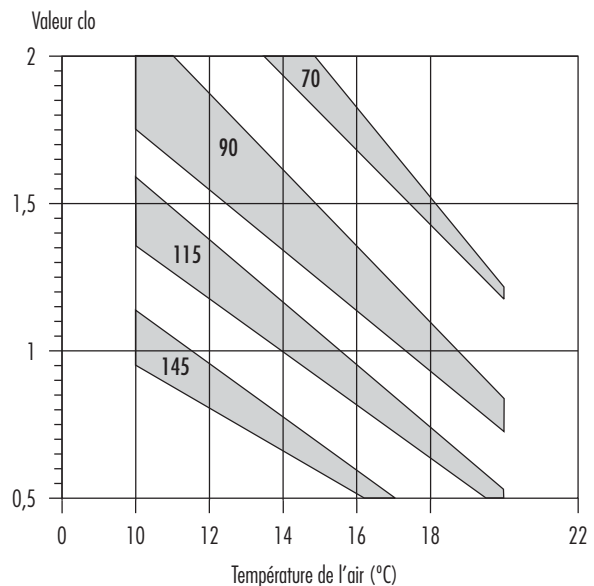
Lorsque la température ambiante tombe au-dessous de 10 °C, la notion de confort est plus difficile à appliquer. Les asymétries thermiques deviennent «normales» (par exemple, le froid au visage et l'inhalation d'air froid). En dépit d'un équilibre thermique optimal du corps, ces asymétries peuvent donner une sensation d'inconfort et nécessiter un surcroît de chaleur pour l'éliminer. Le confort thermique dans le froid, contrairement aux conditions normales dans un local, peut impliquer une légère sensation de chaleur. Il convient de s'en souvenir lorsqu'on évalue la contrainte thermique froide à l'aide de l'indice IREQ.

La performance

L'exposition au froid et les réactions comportementales et physiologiques qu'elle provoque ont un impact sur la performance humaine de niveaux de complexité divers. Le tableau 42.14 présente un aperçu schématisé des différents types d'effets prévisibles sur la performance que peut avoir une exposition à un froid modéré et extrême.

Dans ce contexte, une exposition à un froid modéré n'implique aucun refroidissement ou un refroidissement négligeable du noyau corporel, mais un refroidissement modéré de la peau et des

Figure 42.15 • Température optimale pour le «confort» thermique en fonction des vêtements et du niveau d'activité (W/m²)



extrémités. Une forte exposition au froid est celle qui entraîne un équilibre thermique négatif, avec baisse de la température du noyau corporel et baisse concomitante prononcée de la température des extrémités.

Les caractéristiques physiques d'une exposition modérée ou forte au froid dépendent dans une large mesure de l'équilibre entre la production de chaleur corporelle interne (découlant du travail physique) et la déperdition de chaleur. Ce sont les vêtements de protection et les conditions climatiques ambiantes qui déterminent l'importance de cette déperdition de chaleur.

Comme mentionné précédemment, l'exposition au froid provoque distraction et refroidissement (voir figure 42.14). Ces deux facteurs ont un effet sur la performance, encore que l'importance de cet impact varie en fonction du type de tâche effectuée.

La distraction influe surtout sur le comportement et sur les fonctions mentales, tandis que le refroidissement affecte plutôt la performance physique.

L'interaction complexe des réactions physiologiques et psychologiques (distraction, éveil) à l'exposition au froid n'est pas encore parfaitement comprise et demanderait de nouvelles recherches.

Le tableau 42.15 indique quelles sont les relations entre la performance physique et la température du corps. On part du principe que la performance physique est fortement dépendante de la température des tissus et qu'elle diminue lorsque la température des tissus vitaux et des organes baisse. C'est ainsi que la dextérité manuelle dépend fortement de la température des doigts et des mains, ainsi que de celle des muscles de l'avant-bras. Une grosse activité musculaire est peu affectée par la température de la surface, mais elle est très sensible à la température des muscles. Étant donné que certaines de ces températures sont interdépendantes (par exemple, la température du noyau corporel et celle des muscles), il est difficile de déterminer des relations directes.

L'aperçu général des effets de la température sur la performance donné aux tableaux 42.14 et 42.15 est nécessairement très schématique. Ces données devraient tout au plus servir de signal qu'une action est nécessaire, à savoir une évaluation précise des conditions de travail ou des mesures de prévention.

Un facteur important dans la diminution de la performance est le temps d'exposition. Plus l'exposition au froid est longue, plus son effet sur les tissus profonds et sur les fonctions neuromusculaires est important. En revanche, des facteurs tels que l'accoutumance ou l'expérience atténuent ces effets négatifs et restaurent dans une certaine mesure la capacité de travail.

La performance des mains

Le fonctionnement de la main est particulièrement sensible à l'exposition au froid. En raison de leur faible masse et de leur grande surface, les mains et les doigts perdent beaucoup de chaleur tout en conservant une température des tissus élevée (de 30 à 35 °C). C'est pourquoi ces températures élevées ne peuvent être maintenues que si la production interne de chaleur est importante et permet de conserver un fort débit sanguin dans les extrémités.

On peut réduire la déperdition de chaleur de la main par le port de gants adaptés. Cependant, de bons gants qui protègent du froid sont obligatoirement épais et volumineux et diminuent donc la dextérité et la fonctionnalité de la main. C'est pourquoi des mesures de protection passives ne suffisent pas à préserver la performance des mains dans des environnements froids. Tout au plus, peut-on limiter la perte de la performance par un compromis satisfaisant entre le choix des gants, la façon de travailler et les conditions d'exposition.

La fonctionnalité des mains et des doigts dépend beaucoup de la température locale des tissus (voir figure 42.16). Les mouvements des doigts deviennent moins précis, moins fins et moins rapides lorsque la température des tissus baisse de quelques degrés. Lorsque le refroidissement est plus profond et les tempéra-

Tableau 42.14 • Indication des effets prévisibles de l'exposition au froid modéré et extrême

Performance	Exposition au froid modéré	Exposition au froid extrême
Performance manuelle	0 -	--
Performance musculaire	0	-
Performance aérobie	0	-
Temps de réaction simple	0	-
Temps de réaction au choix	-	--
Dépistage, vigilance	0 -	-
Tâches cognitives, mentales	0 -	--

0 indique aucun effet; - indique une détérioration; -- indique une détérioration importante; 0 - indique des résultats contradictoires.

res plus basses, les fonctions manuelles les plus rudimentaires sont elles aussi perturbées. La fonctionnalité des mains l'est nettement lorsque la température de la peau des mains est d'environ 15 °C, et elle l'est gravement lorsque celle-ci est d'environ 6 à 8 °C, car à ce niveau, il se produit un blocage des fonctions des récepteurs sensoriels et thermiques de la peau. Suivant la dextérité exigée par la tâche à effectuer, il est parfois nécessaire de mesurer la température de la peau à différents endroits de la main et des doigts. La température de l'extrémité des doigts peut être inférieure de plus de 10 degrés à celle du dos de la main, dans certaines conditions d'exposition. La figure 42.17 indique quelques-unes des températures ayant certains effets sur les fonctions manuelles.

La performance neuromusculaire

A en juger par les figures 42.16 et 42.17, il est évident que le froid a un effet prononcé sur les fonctions et sur la performance musculaire. Le refroidissement du tissu musculaire diminue le flux sanguin et ralentit certains processus neurologiques tels que la transmission des signaux nerveux et la fonction synaptique. En outre, la viscosité des tissus augmente et accroît la friction interne pendant le mouvement.

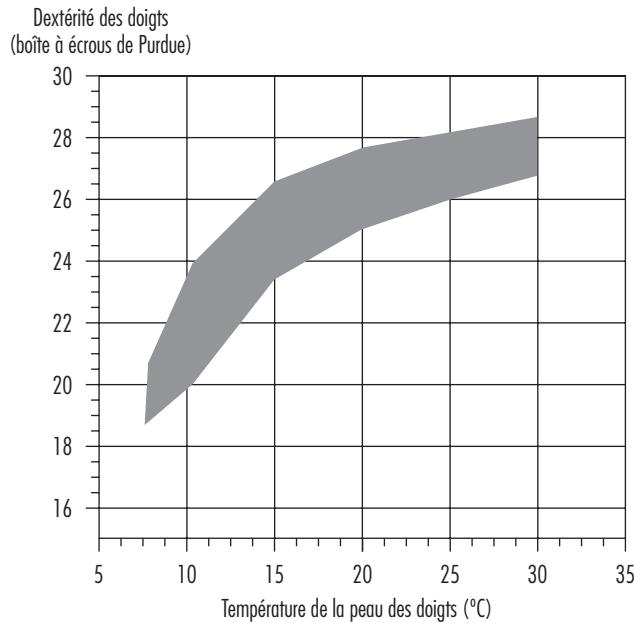
Tableau 42.15 • Importance de la température des tissus corporels pour la performance physique de l'être humain

Performance	Température cutanée des mains et des doigts	Température moyenne de la peau	Température musculaire	Température du noyau corporel
Manuelle simple	-	0	-	0
Manuelle complexe	--	(-)	--	-
Musculaire	0	0 -	--	0 -
Aérobie	0	0	-	--

0 indique aucun effet; - indique une détérioration lorsque la température baisse; -- indique une détérioration importante; 0 - indique des résultats contradictoires; (-) indique des effets mineurs possibles.

42. LA CHALEUR ET LE FROID

Figure 42.16 • Relation entre la dextérité des doigts et la température de la peau des doigts



Source: Daanen, 1993.

La force isométrique diminue de 2% et la force dynamique de 2 à 4% pour chaque degré de température musculaire en moins. En d'autres termes, le refroidissement diminue la force des muscles et plus encore les contractions dynamiques.

La capacité de travail physique

Comme indiqué précédemment, dans le froid, la performance musculaire diminue. Les fonctions musculaires étant perturbées, la capacité de travail physique est globalement réduite. L'un des facteurs qui contribue à réduire la capacité d'effort musculaire est l'augmentation des résistances circulatoires périphériques.

Une vasoconstriction prononcée augmente la circulation centrale, ce qui finit par provoquer une diurèse au froid et une élévation de la pression sanguine. Le refroidissement du noyau corporel peut également avoir un effet direct sur la contractilité du muscle cardiaque.

La capacité de travail, mesurée par la capacité d'effort maximal, diminue de 5 à 6% pour chaque degré de la température du noyau central en moins. Aussi, l'endurance peut-elle décroître rapidement par suite de la diminution de cette capacité maximale et de l'augmentation des besoins en énergie qu'exige le travail musculaire.

Les autres effets du froid

Les températures du corps

C'est la surface du corps qui est la plus sensible (mais aussi la plus tolérante) à une baisse de la température ambiante. La température cutanée peut tomber au-dessous de 0 °C en quelques secondes lorsque la peau est en contact avec un métal très froid. De même, la température des mains et des doigts peut baisser de plusieurs degrés en une minute en cas de vasoconstriction et de protection insuffisante. Lorsque la température cutanée est normale, les bras et les mains sont abondamment irrigués grâce aux dérivations artérioveineuses périphériques, ce qui crée de la cha-

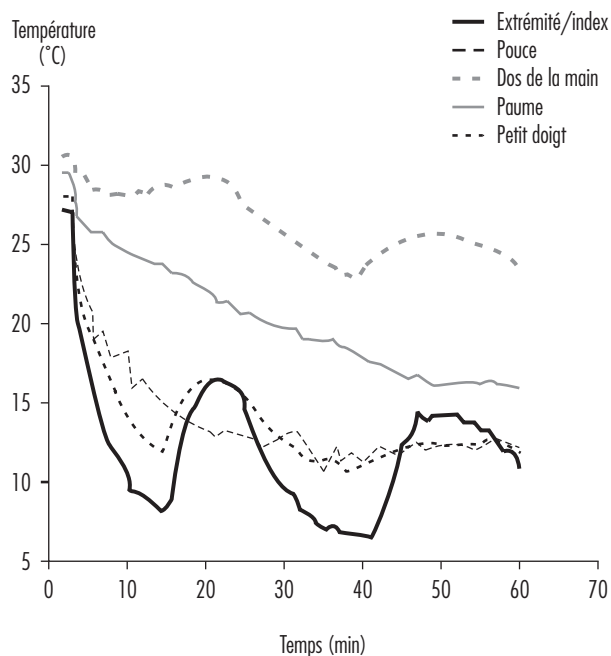
leur et favorise la dextérité. Avec le refroidissement de la peau, ces dérivations se ferment, ce qui diminue de 10% l'irrigation dans les mains et dans les pieds. Les extrémités constituent 50% de la surface du corps et 30% de son volume. Le retour sanguin passe par les veines profondes proches des artères, et diminue donc la déperdition de chaleur suivant le principe du contre-courant.

Il ne se produit pas de vasoconstriction adrénérgique dans la région de la tête et du cou, ce qu'il convient de garder à l'esprit en cas d'urgence pour éviter l'hypothermie. Un individu qui est tête

Figure 42.17 • Estimation des conséquences générales sur la performance manuelle des différentes températures de la main et des doigts



Figure 42.18 • Vasodilatation des vaisseaux des doigts induite par le froid et produisant une variation cyclique de la température des tissus



nue peut perdre 50% ou plus de sa production de chaleur résiduelle à des températures inférieures à 0 °C.

Pour qu'il y ait hypothermie, c'est-à-dire une baisse de la température du noyau central, il faut une déperdition thermique élevée et persistante de l'ensemble du corps (Maclean et Emslie-Smith, 1977). C'est l'équilibre entre la production et la déperdition de chaleur qui détermine le taux de refroidissement, qu'il s'agisse d'un refroidissement de l'ensemble du corps ou d'un refroidissement localisé d'une des parties du corps. Les conditions nécessaires à cet équilibre thermique peuvent être analysées et estimées sur la base de l'indice IREQ. Le phénomène connu sous le nom de «réaction de Lewis» est une réaction au refroidissement localisé des parties saillantes du corps humain (les doigts, les orteils ou les oreilles, par exemple) qui mérite d'être signalée. Après avoir baissé de façon très marquée, la température des doigts augmente de plusieurs degrés (voir figure 42.18), et cette réaction se répète de façon cyclique. C'est une réaction très localisée, qui est plus prononcée à l'extrémité des doigts qu'à leur base et qui ne se produit pas dans la main. La réaction constatée à la paume de la main traduit très probablement la variation de la température du flux sanguin qui irrigue les doigts. Cette réaction peut être modifiée par des expositions répétées au froid (amplifiées), mais elle disparaît plus ou moins lorsqu'il y a refroidissement de l'ensemble du corps.

Le refroidissement progressif du corps provoque un certain nombre d'effets physiologiques et mentaux. Le tableau 42.16 présente certaines des réactions caractéristiques qui se produisent à différents niveaux de la température du noyau central.

Le cœur et la circulation

Un refroidissement du front et de la tête se traduit par une forte augmentation de la pression artérielle systolique, puis du rythme cardiaque. On observe une réaction similaire lorsqu'on plonge les

mains nues dans de l'eau très froide. La réaction est de courte durée et l'on retrouve une température normale ou légèrement élevée au bout de quelques secondes ou quelques minutes.

Lorsqu'elles sont excessives, les déperditions de chaleur corporelle provoquent une vasoconstriction périphérique. Pendant la phase de transition, en particulier, l'accroissement de la résistance

Tableau 42.10 • Réactions de l'être humain au refroidissement; réactions indicatives à différents niveaux d'hypothermie

Phase	Température du noyau du corps (°C)	Réactions physiologiques	Réactions psychologiques
Normale	37	Température normale du corps	Sensation de neutralité thermique
	36	Vasoconstriction, froid aux mains et aux pieds	Inconfort
Hypothermie faible	35	Frissons intenses, capacité de travail amoindrie	Jugement et orientation affectés, apathie
	34	Fatigue	Conscient et réactif
	33	Maladresse et trébuchements	
	32	Rigidité des muscles	Inconscience progressive, hallucinations
Hypothermie modérée	31	Respiration faible	Conscience perturbée
	30		Stupeur
	29	Pas de réflexes nerveux, rythme cardiaque lent et presque imperceptible	
	28	Dysrythmie cardiaque (auriculaire ou ventriculaire)	
Hypothermie grave	27	Les pupilles ne réagissent plus à la lumière, abolition des réflexes tendineux, réflexes superficiels absents.	
	25	Décès dû à la fibrillation ventriculaire ou asystolie	

périphérique entraîne une augmentation de la pression sanguine systolique et du rythme cardiaque. Le cœur travaille plus qu'il ne le ferait pour une activité similaire effectuée à des températures normales, phénomène pénible pour les personnes souffrant d'angine de poitrine.

Le refroidissement des tissus plus profonds ralentit en général les processus physiologiques des cellules et des organes. Ce refroidissement affaiblit le processus d'innervation et limite les contractions cardiaques. La capacité de contraction est réduite, ce qui, ajouté à l'augmentation de la résistance périphérique des vaisseaux sanguins, entraîne une diminution du débit cardiaque. Cependant, en cas d'hypothermie modérée ou grave, les fonctions cardio-vasculaires déclinent dans les mêmes proportions que le ralentissement général du métabolisme.

Les poumons et les voies respiratoires

L'inhalation d'un volume modéré d'air froid et sec ne pose que des problèmes mineurs pour les personnes en bonne santé. L'air très froid peut provoquer un inconfort, en particulier pour la respiration nasale. Des volumes importants d'air très froid peuvent également causer des micro-inflammations de la muqueuse des voies respiratoires supérieures.

A mesure que l'hypothermie progresse, les fonctions pulmonaires diminuent au rythme du ralentissement du métabolisme corporel.

Les aspects fonctionnels (capacité de travail)

Pour pouvoir travailler dans les environnements froids, il est indispensable d'être convenablement protégé contre le refroidissement. Cependant, cette protection peut elle-même compromettre considérablement la performance. On connaît bien la gêne que peuvent occasionner certains vêtements. Les couvre-chefs et les casques font obstacle au dialogue et limitent la vision, et les gants sont une entrave aux fonctions manuelles. Bien qu'une protection soit nécessaire pour travailler dans des conditions satisfaisantes du point de vue de la santé et du confort, on ne saurait en ignorer les conséquences négatives en termes de performance. On mettra plus de temps à effectuer les mêmes tâches et celles-ci demanderont plus d'efforts.

Les vêtements de protection contre le froid peuvent facilement peser de 3 à 6 kg, bottes et chapeau compris. Le poids ajouté à la charge de travail, notamment pour les travaux avec déplacements. En outre, la friction entre les couches de vêtements produit une résistance au mouvement. Les bottes doivent rester légères, car tout poids supplémentaire sur les jambes contribue à augmenter plus que proportionnellement la charge de travail.

L'organisation du travail, l'aménagement des lieux et la conception des équipements devraient être adaptés aux exigences spécifiques des tâches à réaliser dans le froid. Il convient de prévoir davantage de temps pour effectuer le même travail et surtout des pauses fréquentes pour se reposer et se réchauffer. Le lieu de travail doit être conçu de façon que l'on puisse bouger facilement malgré des vêtements encombrants. De même, l'équipement doit pouvoir être utilisé avec des gants, ou être isolé lorsqu'il doit être manié à mains nues.

Les lésions dues au froid

Les lésions graves provoquées par l'air froid sont la plupart du temps évitables et elles ne se produisent que rarement dans la vie de tous les jours. En revanche, elles sont souvent très fréquentes en cas de guerre ou de cataclysmes. Néanmoins, nombreux sont les travailleurs qui risquent d'être victimes de lésions dues au froid au cours de leurs activités de routine. Tout travail en plein air dans des climats très froids (dans les régions arctiques et subarctiques (par exemple, pêche, agriculture, construction, exploitation du gaz et du pétrole ou surveillance de troupeaux de rennes) ou

tout travail dans des locaux réfrigérés (par exemple, dans l'agroalimentaire ou l'entreposage) peuvent impliquer des risques de lésions par le froid.

Les lésions dues au froid peuvent être systémiques ou localisées. Les lésions localisées, qui le plus souvent précèdent une hypothermie systémique, comprennent deux phénomènes cliniques différents: les lésions par gelure et les lésions sans gelure.

Les lésions par gelure

La physiopathologie

Ce type de lésions localisées se produit lorsque la déperdition de chaleur est suffisamment forte pour entraîner un véritable gel des tissus. Outre le choc cryogénique direct infligé aux cellules, il s'enclenche des mécanismes pathogènes résultant des atteintes à la vascularisation par diminution de l'irrigation et hypoxie des tissus.

La vasoconstriction des vaisseaux cutanés est la cause majeure de l'apparition d'une gelure. Grâce aux larges dérivations artérioveineuses, les extrémités périphériques telles que les mains, les pieds, le nez et les oreilles sont abondamment irriguées lorsque l'environnement est chaud. Un dixième du flux sanguin dans les mains, par exemple, est suffisant pour oxygéner les tissus des mains. Le reste crée de la chaleur et favorise donc la dextérité. Même si la température du noyau central ne diminue pas, un refroidissement localisé de la peau peut fermer ces dérivations.

Pour protéger les zones périphériques des extrémités pendant une exposition au froid, il se produit une vasodilatation intermittente induite par le froid. Cette vasodilatation résulte de l'ouverture des anastomoses artérioveineuses et se produit toutes les 5 à 10 minutes. Ce phénomène est un compromis physiologique que le corps humain a trouvé pour conserver sa chaleur tout en préservant par intermittence la fonctionnalité des pieds et des mains. Cette vasodilatation est perçue par la personne sous la forme de fourmillements intermittents de chaleur. Elle tend à diminuer à mesure que la température du corps diminue. Les variations individuelles du degré de vasodilatation sont sans doute la cause des différences de sensibilité aux lésions localisées provoquées par le froid. Chez les gens qui vivent dans des climats froids, cette vasodilatation induite par le froid est plus prononcée.

Contrairement au phénomène de cryoconservation d'un tissu vivant où la cristallisation de la glace est à la fois intra- et extracellulaire, les lésions par gelure où le processus de gel est beaucoup plus lent ne produisent que des cristaux de glace extracellulaires. Il s'agit d'un processus exothermique qui libère de la chaleur et la température des tissus reste donc au point de congélation jusqu'à ce que celle-ci soit complète.

A mesure que les cristaux de glace extracellulaires se développent, les solutions extracellulaires se concentrent et transforment cet espace en milieu hyperosmolaire, ce qui provoque une diffusion passive de l'eau venant du compartiment intracellulaire. A son tour, cette eau gèle. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que toute l'eau «disponible» (c'est-à-dire non liée d'une manière ou d'une autre à des protéines, des sucres ou à toute autre molécule) se soit cristallisée. La déshydratation des cellules altère les structures des protéines, des lipides membranaires et du pH cellulaire, ce qui entraîne une cytolysse. La résistance aux lésions par gelure diffère selon les tissus. La peau, par exemple, est plus résistante que les muscles et les nerfs, ce qui provient sans doute de ce que l'épiderme contient moins d'eau aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des cellules.

On a longtemps pensé que les facteurs hémorhéologiques indirects jouaient le même rôle que dans les lésions sans gelure. Toutefois, des études réalisées sur des animaux ont montré que le gel provoque des lésions au cœur même des artères, des veines et des vaisseaux capillaires avant même que ne se manifestent

des signes de lésions d'autres éléments de la peau. Il est donc évident que la partie rhéologique de la pathogenèse des lésions par gelure est également un effet cryobiologique.

Lorsqu'une gelure est réchauffée, l'eau commence par rediffuser dans les cellules déshydratées, ce qui provoque un gonflement intracellulaire. Le dégel cause une dilatation vasculaire maximale entraînant la formation d'un œdème et d'une cloque dus aux lésions des cellules endothéliales (couche interne de la peau). La rupture des cellules endothéliales expose la membrane basale, ce qui provoque des adhérences plaquettaires et une coagulation en chaîne. La stagnation du sang et la thrombose qui en résultent provoquent une anoxie.

La déperdition de chaleur dans les zones exposées crée le risque de gelure, le vent froid est donc un facteur important à cet égard. Il s'agit non seulement du vent qui souffle, mais aussi de tout déplacement d'air près du corps. La course, le ski et le transport dans des véhicules ouverts sont également à prendre en compte. Cependant, la peau qui est exposée ne gèle pas tant que la température ambiante est supérieure au point de congélation, même lorsque la vitesse du vent est élevée.

La consommation d'alcool et de tabac, de même que la malnutrition et la fatigue sont des facteurs qui prédisposent aux lésions par gelure. Une ancienne lésion due au froid accroît le risque de gelure par réaction post-traumatique sympathique anormale.

Le métal froid peut très vite provoquer une gelure lorsqu'on le touche à mains nues. La plupart des gens en sont conscients, mais, souvent, ils ne se rendent pas compte du risque qu'ils courent lorsqu'ils manipulent des liquides très froids. Le pétrole refroidi à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ gèle presque instantanément toute chair mise en contact, car à la déperdition de chaleur par évaporation s'ajoute une déperdition par conduction. Ce gel rapide provoque une cristallisation à l'extérieur et à l'intérieur des cellules, ainsi que la destruction (surtout mécanique) de la membrane des cellules. Des lésions par gelure du même genre se produisent lorsqu'on renverse du produit liquide directement sur la peau.

Le tableau clinique

Les lésions par gelure se subdivisent en gelures superficielles et gelures profondes. La gelure superficielle se limite à la peau et aux tissus sous-cutanés sous-jacents. Dans la plupart des cas, elle se situe sur le nez, les lobes des oreilles, les doigts et les orteils. Une sensation de brûlure et des fourmillements douloureux en sont souvent le premier signe. La partie de la peau affectée pâlit ou devient d'un blanc de cire. Elle est engourdie et se fendille sous la pression, tandis que les tissus sous-jacents restent souples et vivants. Lorsque la lésion par gelure est profonde, la peau blanchit et se marbre, durcit et colle quand on la touche.

Le traitement

Une gelure doit être traitée immédiatement pour empêcher que de superficielle elle ne se transforme en gelure profonde. On tentera d'amener la victime à l'intérieur, ou au moins de la protéger du vent avec l'aide de ses camarades, d'un abri vent ou par tout autre moyen. La zone gelée devra être dégelée par transmission passive de chaleur d'une autre partie de son corps, en posant sa main chaude sur le visage ou en glissant la main froide sous l'aisselle ou dans l'aîne. Lorsqu'il s'agit d'une lésion avec vasoconstriction périphérique, c'est la chaleur de l'un de ses compagnons qui sera la meilleure thérapie. Il est contre-indiqué de masser ou de frotter la zone gelée avec de la neige ou une écharpe en laine. Ce traitement mécanique ne ferait qu'aggraver la lésion, car le tissu est plein de cristaux de glace. Il ne faut pas non plus tenter le réchauffement près d'un feu de camp ou d'un poêle. La chaleur ne pénètre pas en profondeur, et comme la zone est partiellement anesthésiée, ce traitement peut même être la cause d'une brûlure.

Les signaux de douleur d'un pied gelé disparaissent avant que la gelure ne se produise réellement, car la conduction nerveuse est abolie à environ $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le paradoxe est que la dernière sensation que l'on éprouve est de ne rien sentir du tout. Dans des environnements très froids, lorsque l'évacuation de la victime doit se faire à pied, on évitera que le pied ne dégèle. Le fait de marcher quand on a les pieds gelés ne semble pas augmenter le risque de perte des tissus, alors que geler de nouveau une gelure dégelée l'augmente considérablement.

Le meilleur traitement contre une gelure consiste à dégeler la blessure dans de l'eau chaude, de $40\text{ à }42\text{ }^{\circ}\text{C}$. On poursuivra la procédure de dégel dans l'eau, à cette température, jusqu'à ce que la sensation, la couleur et la souplesse des tissus reviennent. Cette forme de dégel donne souvent une teinte non pas rose, mais lie-de-vin, due à la stase veineuse.

Sur le terrain, on ne peut se limiter à un dégel localisé, mais il faut s'occuper de l'ensemble du corps de la victime, car une gelure est souvent le premier signe d'une hypothermie progressive. Il faudra lui faire endosser davantage de vêtements et lui faire prendre des boissons chaudes et nourrissantes. Elle sera souvent apathique et il faudra la forcer à coopérer. On l'obligera donc à effectuer une activité musculaire telle que battre des bras sur les côtés. Ces mouvements ouvrent les dérivations artérioveineuses périphériques dans les extrémités.

On peut parler de gelure profonde lorsqu'on a tenté en vain de dégeler la lésion pendant 20 à 30 minutes, par un transfert de chaleur passif. Dans ce cas, la victime devrait être transportée à l'hôpital le plus proche. Cependant, si ce transport doit prendre plusieurs heures, il sera préférable d'emmener la personne dans une habitation avoisinante et de dégeler ses blessures dans de l'eau chaude. Une fois que la lésion est complètement dégelée, le patient devrait être mis au lit en surélevant les parties blessées, et l'on organisera son transport rapide à l'hôpital.

Un réchauffement rapide provoque une douleur plus ou moins vive, et le patient aura souvent besoin d'un analgésique. Les lésions des capillaires provoquent une fuite de sérum avec boursofflure locale et formation de cloques pendant 6 à 18 heures. On s'abstiendra de crever les cloques afin d'éviter tout risque d'infection.

Les lésions dues au froid sans gelure

La physiopathologie

Une exposition prolongée au froid et à l'humidité à une température supérieure au point de congélation, associée à une immobilisation provoquant une stagnation veineuse sont les conditions propices à une lésion sans gelure. Déshydratation, nourriture inadaptée, stress, maladie ou blessure et fatigue sont des facteurs aggravants. Ce type de lésions affecte presque toujours les jambes et les pieds. Les lésions graves de ce type sont très rares dans la vie de tous les jours, mais elles sont et seront toujours un problème sérieux en cas de guerre ou de catastrophe, la plupart du temps en raison de l'ignorance que l'on a du phénomène étant donné que les symptômes n'apparaissent que lentement et sont difficiles à diagnostiquer.

Une lésion sans gelure peut se produire dans n'importe quelles circonstances dès que la température ambiante est inférieure à celle du corps. Comme pour les lésions avec gelure, les fibres sympathiques constrictives, en plus du froid proprement dit, provoquent une vasoconstriction prolongée. À l'origine, la cause est de nature rhéologique et ressemble à ce que l'on observe dans les accidents ischémiques de reperfusion. Outre la durée de l'exposition au froid, la sensibilité propre à la victime a une certaine importance.

La modification pathologique due à la lésion ischémique affecte de nombreux tissus. Les muscles dégénèrent et subissent des né-

croses, des fibroses et des atrophies. Les os présentent rapidement une ostéoporose. Les effets sur les nerfs ont une importance particulière, car les atteintes qu'ils ont subies sont la cause des douleurs, de la dysesthésie prolongée et de l'hyperhydrose qui sont souvent les séquelles de ce type de lésions.

Le tableau clinique

En cas de lésion sans gelure, la victime se rend compte souvent trop tard du danger qui la menace, car les premiers symptômes sont très vagues. Ses pieds sont froids et enflés. Ils donnent la sensation d'être lourds, durs et engourdis. Ils sont décrits comme froids, douloureux, sensibles, et la plante du pied est souvent ridée. La première phase ischémique dure plusieurs heures, voire plusieurs jours. Elle est suivie de la phase hyperémique qui peut durer de 2 à 6 semaines, au cours de laquelle les pieds sont chauds, mais avec des élancements et le développement d'un œdème. Les cloques et les ulcérations ne sont pas rares et, dans les cas graves, la gangrène peut apparaître.

Le traitement

Le traitement sera surtout un traitement de soutien. Sur le lieu de travail, on séchera soigneusement les pieds, tout en les gardant au frais. En revanche, on réchauffera l'ensemble du corps et on donnera beaucoup de boissons chaudes. Contrairement aux lésions avec gelure, les lésions sans gelure ne doivent jamais être réchauffées activement. Un traitement à l'eau chaude pour des lésions localisées n'est à faire que s'il y a des cristaux de glace dans les tissus. En règle générale, la suite du traitement est progressive. Cependant, de la fièvre, des signes de coagulation intravasculaire disséminée et un ramollissement des tissus affectés exigent une intervention chirurgicale, qui peut mener à une amputation.

Il est possible de prévenir les lésions sans gelure. Il convient de limiter la durée de l'exposition au froid. Il est très important d'absorber une nourriture adaptée, de prendre le temps de se sécher les pieds et de prévoir la possibilité d'enfiler des chaussettes sèches. Il peut sembler ridicule de conseiller le repos, les pieds surélevés, et l'administration de boissons chaudes, mais c'est souvent d'une importance cruciale.

L'hypothermie

Il y a une hypothermie quand la température du corps tombe au-dessous de la normale. Toutefois, du point de vue thermique, le corps est composé de deux zones, l'écorce et le noyau central. La première est superficielle et sa température varie énormément selon le milieu dans lequel on se trouve. Le noyau central est composé des tissus plus profonds (le cerveau, le cœur, les poumons et la partie supérieure de l'abdomen, par exemple), et le corps lutte pour conserver une température du noyau central de 37 ± 2 °C. Lorsque la thermorégulation est inefficace et que la température du noyau central commence à diminuer, l'individu souffre du froid, mais n'est pas considéré dans un état d'hypothermie tant que la température du noyau central ne descend pas à 35 °C. Entre 35 et 32 °C, l'hypothermie est considérée comme faible; entre 32 et 28 °C, elle est modérée, et au-dessous de 28 °C, elle est grave (voir tableau 42.16)

Les effets physiologiques de la baisse de la température du noyau central

Lorsque la température du noyau central commence à diminuer, une intense vasoconstriction redirige le sang de l'écorce vers le noyau central et empêche donc la conduction de la chaleur du noyau à la peau. Afin de maintenir la température, le corps frissonne. Ce phénomène est souvent précédé d'une augmentation du tonus musculaire. Un frisson maximal peut multiplier le métabolisme énergétique par quatre à six, mais étant donné que les contractions involontaires fluctuent, ce taux n'est souvent que

doublé. La pression sanguine, la fréquence cardiaque, le débit cardiaque et la fréquence respiratoire augmentent. La centralisation du volume sanguin provoque une diurèse osmolaire riche en sodium et en chlore principalement.

L'hyperexcitabilité du noyau auriculaire au premier stade de l'hypothermie provoque souvent une fibrillation auriculaire. A des températures plus basses, les extrasystoles ventriculaires deviennent courantes. Le décès intervient à 28 °C ou en deçà, et résulte le plus souvent de la fibrillation ventriculaire. Une asystolie peut également survenir.

L'hypothermie déprime le système nerveux central. La lassitude et l'apathie sont les premiers signes de la baisse de la température du noyau. Ces effets affectent le jugement et génèrent des comportements bizarres et une ataxie, et se terminent par la léthargie et le coma entre 30 et 28 °C.

La rapidité de la conduction nerveuse diminue à mesure que la température baisse. La dysarthrie, la maladresse et le trébuchement sont les manifestations cliniques de ce phénomène. Le froid affecte aussi les muscles et les articulations et gêne les fonctions manuelles. Il ralentit le temps de réaction et la coordination et augmente la fréquence des erreurs. La rigidité des muscles est observée même dans les cas de faible hypothermie. Lorsque la température du noyau est inférieure à 30 °C, l'activité physique est impossible.

Une exposition à un environnement anormalement froid est la condition de base de l'hypothermie. Les sujets très âgés ou très jeunes courent davantage de risques. Les personnes âgées dont les fonctions thermorégulatrices sont endommagées, ou les personnes dont la masse musculaire et la couche de graisse isolante sont réduites risquent davantage de souffrir d'hypothermie.

La classification

D'un point de vue pratique, la subdivision suivante des hypothermies est utile (voir aussi tableau 42.16):

- L'hypothermie accidentelle;
- L'hypothermie d'immersion aiguë;
- L'hypothermie d'épuisement subaiguë;
- L'hypothermie associée à un traumatisme;
- L'hypothermie chronique sans symptômes définis.

L'hypothermie d'immersion aiguë se produit lorsqu'une personne tombe dans de l'eau froide. L'eau a une conductivité thermique environ vingt-cinq fois supérieure à celle de l'air. Les troubles dus au froid sont si importants que la température du noyau central diminue en dépit d'une production de chaleur du corps maximale. L'hypothermie s'installe avant que la victime ne soit épuisée.

L'hypothermie d'épuisement subaiguë peut se produire chez tout travailleur se trouvant dans un environnement froid, ainsi que chez les skieurs, les alpinistes et les marcheurs en montagne. Dans cette forme d'hypothermie, l'activité musculaire maintient la température du corps tant que l'on dispose de sources d'énergie. Cependant, l'hypoglycémie met la victime en danger. Même une exposition à un froid relativement peu rigoureux peut suffire pour générer un refroidissement continu et provoquer des situations dangereuses.

L'hypothermie associée à un traumatisme est un signe de mauvais augure. Le blessé est souvent incapable de conserver sa chaleur corporelle et la déperdition thermique peut être accentuée par la perfusion de liquides froids et le retrait des vêtements. Les blessés en état de choc qui souffrent d'hypothermie ont un taux de mortalité nettement supérieur à celui des victimes normothermiques.

L'hypothermie chronique sans symptômes définis est souvent rencontrée chez les personnes âgées; elle est généralement associée à la malnutrition, à des vêtements mal adaptés et à une mobilité réduite.