

Rédacteur  
*Jean-Jacques Vogt*

### Table des matières

Les réponses physiologiques à l'environnement thermique.....	<i>W. Larry Kenney</i>	42.2
Les effets de la contrainte thermique et du travail à la chaleur.....	<i>Bodil Nielsen</i>	42.5
Les troubles provoqués par la chaleur.....	<i>Tokuo Ogawa</i>	42.8
La prévention de la contrainte thermique	<i>Sarah A. Nunneley</i>	42.11
Les bases physiques du travail à la chaleur.....	<i>Jacques B. Malchaire</i>	42.15
L'évaluation de la contrainte thermique et les indices de contrainte thermique.....	<i>Kenneth C. Parsons</i>	42.17
L'échange thermique à travers les vêtements.....	<i>Wouter A. Lotens</i>	42.26
Les environnements froids et le travail au froid.....	<i>Ingvar Holmér, Per-Ola Granberg et Göran Dahlström</i>	42.32
La prévention de la contrainte thermique froide dans des conditions extrêmes	<i>Jacques H.M. Bittel et Gustave Savourey</i>	42.51
Les indices et les normes relatifs au froid.....	<i>Ingvar Holmér</i>	42.54

## ● LES RÉPONSES PHYSIOLOGIQUES À L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE

W. Larry Kenney

Durant toute son existence, l'être humain vit dans une gamme très étroite et fortement protégée de températures centrales. Les limites maximales de tolérance pour les cellules vivantes vont approximativement de 0 °C (formation des cristaux de glace) à 45 °C (coagulation thermique des protéines intracellulaires); toutefois, il peut tolérer des températures centrales inférieures à 35 °C ou supérieures à 41 °C, mais seulement durant de très courtes périodes. Afin de maintenir la température interne dans ces limites, il a développé des réponses physiologiques très efficaces et, dans certains cas, spécialisées, à la contrainte thermique aiguë. Ces réponses — conçues pour permettre la conservation, la production ou l'élimination de la chaleur du corps — impliquent la coordination de plusieurs systèmes de l'organisme.

### L'équilibre thermique humain

La source de loin la plus importante de chaleur fournie au corps provient de la production métabolique de chaleur ( $M$ ). Même au pic de l'efficacité mécanique, 75 à 80% de l'énergie intervenant dans l'effort musculaire sont libérés sous forme de chaleur. Au repos, un taux métabolique de 300 ml de  $O_2$  par minute crée une charge thermique d'approximativement 100 W. Durant l'effort à l'état d'équilibre, à une consommation d'oxygène de 1 litre/min, ce sont environ 350 W de chaleur qui sont produits — moins toute l'énergie liée au travail externe ( $W$ ). Même à cette intensité faible à modérée de l'effort, la température centrale du corps s'élèverait d'approximativement 1 °C toutes les 15 minutes s'il n'était un moyen efficace de dissipation thermique. En réalité, les sujets en parfaite condition physique peuvent produire plus de 1 200 W de chaleur pendant 1 à 3 heures sans en subir d'effets néfastes (Gisolfi et Wenger, 1984).

La chaleur peut aussi être fournie par l'environnement soit par rayonnement ( $R$ ), soit par convection ( $C$ ) lorsque la température à la surface du globe (mesure de la chaleur radiante) et celle de l'air (thermomètre sec) sont l'une ou l'autre supérieures à la température de la peau. Normalement, ces voies d'apport thermique sont faibles par rapport à  $M$  et deviennent en fait des voies de déperdition de chaleur lorsque le gradient de température peau-air est inversé. L'ultime voie de déperdition thermique — l'évaporation ( $E$ ) — est, elle aussi, la plus importante normalement étant donné que la chaleur latente de la vaporisation de la sueur est élevée — la sueur s'évaporant à raison d'environ 680 Wh/litre. Ces relations sont examinées plus loin dans le présent chapitre.

Lorsque du point de vue thermique les conditions sont fraîches à neutres, l'apport de chaleur et la déperdition thermique se compensent, il n'y a pas stockage de chaleur et la température du corps s'équilibre, autrement dit:

$$M - W \pm R \pm C - E = 0$$

Cependant, en cas d'exposition à des températures plus élevées:

$$M - W \pm R \pm C > E$$

et il y a stockage de chaleur. Ce genre de situation peut être créée en particulier par un travail de force (dépense élevée d'énergie qui accroît  $M - W$ ), des températures de l'air excessivement élevées (qui élèvent  $R + C$ ), une forte humidité (qui limite  $E$ ) et le port de vêtements épais ou relativement imperméables (qui créent un obstacle à l'évaporation efficace de la sueur). Enfin, si l'exercice est prolongé ou si l'hydratation est insuffisante,  $E$  peut être freinée par l'incapacité du corps à sécréter davantage de sueur (1 à 2 litres/h pendant de courtes périodes).

### La régulation des températures corporelles

Pour une description simple des réponses physiologiques à la chaleur et au froid, on divise le corps en deux composantes — le «noyau» et l'«écorce». La température centrale ( $T_c$ ) représente la température interne ou profonde du corps et peut être mesurée par méthode orale, rectale ou, en laboratoire, dans l'œsophage ou sur la membrane du tympan. La température de l'écorce est représentée par la température moyenne de la peau ( $T_{sk}$ ). La température moyenne du corps ( $T_b$ ) à un moment quelconque correspond à un équilibre pondéré entre ces deux températures, c'est-à-dire:

$$T_b = k T_c + (1 - k) T_{sk}$$

où le facteur de pondération  $k$  varie d'environ 0,67 à 0,90.

Lorsqu'il est confronté à des défis de neutralité thermique (contraintes causées par la chaleur ou le froid), le corps s'efforce de réguler  $T_c$  par des ajustements physiologiques et  $T_c$  fournit au cerveau les principales informations dont il a besoin pour coordonner cette régulation. Tandis que la température locale et la température moyenne de la peau sont importantes pour fournir des données sensorielles,  $T_{sk}$  varie largement en fonction de la température ambiante, avec une valeur moyenne d'environ 33 °C à la neutralité thermique pouvant atteindre 36 à 37 °C dans des conditions de travail de force à la chaleur. Il lui est possible de chuter fortement par exposition de tout le corps ou d'une certaine partie du corps au froid; la sensibilité tactile au froid apparaît entre 15 et 20 °C, la température critique pour la dextérité manuelle se situant entre 12 et 16 °C. Les valeurs, supérieure et inférieure, du seuil de douleur pour  $T_{sk}$  sont approximativement de 43 et de 10 °C, respectivement.

Des études précises de cartographie ont permis de situer la zone la plus importante de thermorégulation dans la région pré-optique de l'hypothalamus antérieur (POHA). Cette région comprend des cellules nerveuses qui répondent à l'échauffement (neurones sensibles à la chaleur) et au refroidissement (neurones sensibles au froid). Cette région domine la régulation de la température du corps en recevant les informations sensorielles afférentes, relatives à la température du corps, et en envoyant des signaux efférents à la peau, aux muscles et aux autres organes intervenant dans la régulation de la température, par l'intermédiaire du système nerveux sympathique. D'autres régions du système nerveux central (hypothalamus postérieur, formation réticulaire, protubérance annulaire, partie médullaire et moelle épinière) constituent les liaisons ascendantes et descendantes avec le POHA et permettent diverses fonctions de facilitation.

Le système de régulation de la température du corps est analogue à celui de la régulation thermostatique de la température d'une maison, avec les deux fonctions de chauffage et de refroidissement. Lorsque la température du corps s'élève au-dessus d'une certaine température théorique d'un «point de repère», les réponses des effecteurs associées au refroidissement (transpiration, accroissement de l'irrigation cutanée) sont activées. Si la température du corps tombe en dessous du point de repère, ce sont des réponses pour des apports de chaleur (diminution de l'irrigation cutanée, frissons) qui sont mises en route. Cependant, contrairement aux systèmes de chauffage/refroidissement d'une maison, la régulation thermique chez l'humain ne fonctionne pas comme un simple système marche-arrêt, mais possède aussi des régulations proportionnelles aux valeurs à ajuster et aux vitesses de variation de ces valeurs. Il faut noter que la «température de point de repère» n'existe qu'en théorie et sert surtout à visualiser ces notions. Il reste beaucoup à faire pour comprendre totalement les mécanismes associés au point de repère de régulation thermique.

Quel que soit son fondement, ce point de repère est relative-ment stable et n'est pas influencé par l'effort ou la température

ambiante. En réalité, la seule perturbation aiguë connue pour le décaler est le groupe de pyrogènes endogènes intervenant dans la réponse fébrile. Les réponses des effecteurs que le corps emploie pour maintenir l'équilibre thermique commencent et sont contrôlées en réaction à un «écart de réglage», c'est-à-dire à une température du corps momentanément supérieure ou inférieure au point de repère (voir figure 42.1). Une température centrale inférieure au point de repère crée un écart de réglage négatif qui aboutit à un apport de chaleur (frissons, vasoconstriction cutanée). Une température centrale supérieure au point de repère crée un écart de réglage positif, qui active les effecteurs de déperdition thermique (vasodilatation cutanée, sudation). Dans chaque cas, le transfert thermique diminue l'écart de réglage et permet à la température du corps de revenir à un état d'équilibre.

### La régulation de la température à la chaleur

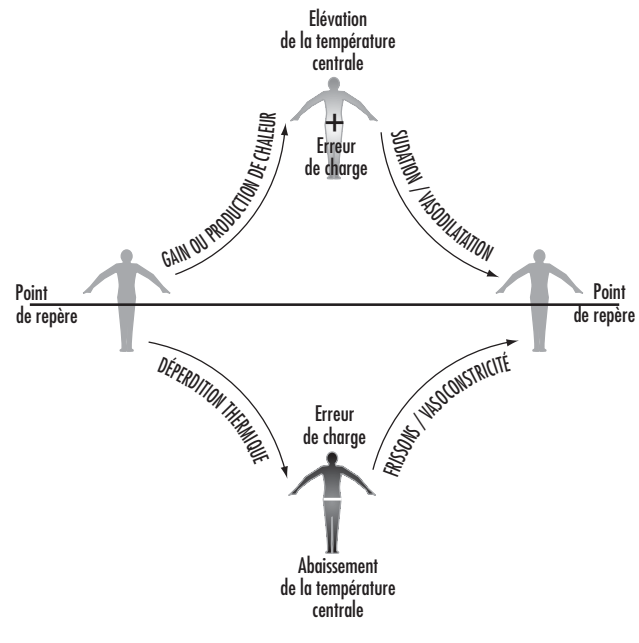
Comme on l'a vu, l'être humain dissipe de la chaleur dans l'environnement principalement par la combinaison de transferts secs (rayonnement et convection) et par évaporation. Pour faciliter ces échanges, deux systèmes d'effecteurs principaux sont activés et régulés — la vasodilatation cutanée et la transpiration. Tandis que la vasodilatation cutanée produit de faibles élévations de la déperdition thermique sèche (rayonnement et convection), sa fonction première consiste à transférer de la chaleur du noyau à la peau (transfert thermique interne), alors que l'évaporation de la sueur est un moyen extrêmement efficace pour refroidir le sang (transfert thermique externe) avant son retour dans les tissus profonds du corps.

#### La vasodilatation cutanée

La quantité de chaleur transférée du noyau à la peau est fonction du débit sanguin cutané (DSC), du gradient de température entre le noyau et la peau, et de la chaleur spécifique du sang (un peu moins de 4 kJ/°C par litre de sang). Au repos dans un environnement thermique neutre, le débit sanguin cutané est d'approximativement 200 à 500 ml/min, soit seulement 5 à 10% du sang total pompé par le cœur (débit cardiaque). En raison du gradient de 4 °C entre  $T_c$  (environ 37 °C) et  $T_{sk}$  (environ 33 °C dans ces conditions), la chaleur métabolique produite par le corps pour maintenir la vie est constamment transmise par convection à la peau pour dissipation. Au contraire, dans des conditions d'hyperthermie importante, comme le travail très intense à la chaleur, le gradient de température entre le noyau et la peau est plus faible, et le transfert thermique nécessaire s'effectue par une augmentation importante du débit sanguin cutané. Sous stress thermique maximal, l'irrigation cutanée peut atteindre 7 à 8 litres/min, soit environ un tiers du débit cardiaque (Rowell, 1983). Cette circulation sanguine élevée est due à un mécanisme mal connu, unique à l'humain, appelé «système vasodilatateur actif». La vasodilatation active fait intervenir des signaux des nerfs sympathiques, allant de l'hypothalamus aux artérioles de la peau, mais le neurotransmetteur n'a pas été déterminé.

Comme indiqué précédemment, le débit sanguin cutané répond avant tout aux élévations de  $T_c$  et, dans une moindre mesure, de  $T_{sk}$ . La  $T_c$  s'élève dès que le travail musculaire induit une production de chaleur métabolique et, dès qu'un certain seuil de  $T_c$  est atteint, le débit sanguin cutané augmente aussi de façon importante. Cette réaction de base de la thermorégulation est modulée par des facteurs non thermiques. Ce deuxième niveau de régulation est critique parce qu'il modifie l'irrigation cutanée lorsque la stabilité cardio-vasculaire générale est menacée. Les veines de la peau sont très souples et une partie non négligeable du volume en circulation s'accumule dans ces vaisseaux. Cela facilite l'échange thermique en ralentissant la circulation capillaire afin d'accroître le temps de transit à travers la peau. Cependant, cette accumulation, associée aux déperditions de fluide par la transpira-

Figure 42.1 • Modèle de régulation thermique humaine



tion, peut aussi diminuer le retour sanguin veineux. Le travail en station debout, la déshydratation et la respiration sous pression positive (port d'un appareil de protection respiratoire) comptent parmi les facteurs non thermiques dont l'influence sur l'irrigation cutanée a été démontrée. Ils agissent par l'intermédiaire de réflexes qui sont activés lorsque la pression de remplissage cardiaque diminue et que les barorécepteurs des troncs veineux situés dans les grandes veines et l'oreillette droite ne sont pas stimulés; c'est pourquoi ils sont plus évidents durant le travail aérobic prolongé en station debout. Ces réflexes ont pour fonction de maintenir la tension artérielle et, au travail, de maintenir une circulation sanguine adéquate dans les muscles actifs. Ainsi, le niveau de l'irrigation cutanée à un moment donné représente les effets combinés des réponses réflexes avec et sans effet de régulation thermique.

L'augmentation du débit sanguin cutané dans le cadre de la thermorégulation modifie de façon importante les capacités du système cardio-vasculaire à réguler la tension artérielle. D'où la nécessité d'une réponse coordonnée de tout le système cardio-vasculaire à la contrainte thermique. Quels ajustements cardio-vasculaires permettent l'augmentation du débit et du volume sanguin cutané? Pendant le travail dans des conditions fraîches ou neutres, l'élévation de la fréquence cardiaque répond bien à l'augmentation nécessaire du débit cardiaque, car le volume systolique cesse pratiquement d'augmenter quand l'effort dépasse 40% de son maximum. À la chaleur, la fréquence cardiaque est plus élevée quelle que soit l'intensité du travail, pour compenser la réduction du volume sanguin circulant et du volume systolique. Lorsque les niveaux de travail sont plus élevés, la fréquence cardiaque maximale est atteinte et cette tachycardie ne peut pas maintenir le débit cardiaque nécessaire. Le second moyen par lequel le corps assure une irrigation cutanée élevée est une redistribution de la circulation sanguine aux dépens d'organes tels que le foie, les reins et les intestins (Rowell, 1983). Cette redistribution de la circulation peut fournir 800 à 1 000 ml de sang en plus à la peau et permettre de compenser les effets préjudiciables de l'accumulation périphérique de sang.

### La sudation

La sueur permettant la régulation thermique chez l'humain est sécrétée par 2 à 4 millions de glandes sudoripares exocrines réparties de manière non uniforme à la surface du corps. Contrairement aux glandes sudoripares apocrines, qui ont tendance à être groupées (sur le visage, les mains et les régions axillaires et génitales) et qui sécrètent de la sueur dans les follicules pileux, les glandes exocrines sécrètent de la sueur directement à la surface de la peau. Cette sueur est inodore, incolore et relativement diluée, car il s'agit d'un ultrafiltrat du plasma. Elle possède ainsi une chaleur latente de vaporisation élevée et est idéalement adaptée à son rôle de rafraîchissement.

Un exemple permet de démontrer l'efficacité de ce système de refroidissement: un homme travaillant avec une consommation d'oxygène de 2,3 litres/min produit une chaleur métabolique nette ( $M - W$ ) d'environ 640 W. Sans sudation, la température du corps s'élèverait au rythme d'environ 1 °C toutes les 6 à 7 minutes. Avec une évaporation efficace d'environ 16 g de sueur par minute (débit raisonnable), la déperdition thermique peut correspondre à la production de chaleur, et la température centrale peut être maintenue à un état d'équilibre, c'est-à-dire:

$$M - W \pm R \pm C - E = 0$$

Les glandes exocrines ont une structure simple, comprenant une partie sécrétoire enroulée, un conduit et un pore cutané. Le volume de sueur produit par chaque glande dépend de sa structure et de sa fonction; le débit sudoral, quant à lui, dépend du recrutement des glandes (densité de glandes sudoripares actives) et du débit des glandes sudoripares. Le fait que certaines personnes transpirent plus que d'autres est dû principalement aux différences de taille des glandes sudoripares (Sato et Sato, 1983). L'acclimatation à la chaleur est un autre facteur déterminant de la production de sueur. Avec l'âge, l'abaissement des taux de sudation est dû non pas au plus faible nombre de glandes exocrines actives, mais à la diminution du débit de sueur par glande (Kenney et Fowler, 1988). Cette réduction est probablement liée à une combinaison des altérations structurelles et fonctionnelles qui accompagnent le processus du vieillissement.

De même que les signaux vasomoteurs, les impulsions nerveuses transmises aux glandes sudoripares proviennent de la zone préoptique de l'hypothalamus antérieur et descendent le long du tronc cérébral. Les fibres qui innervent les glandes sont des fibres sympathiques cholinergiques, combinaison rare chez l'humain. Alors que l'acétylcholine est le principal neurotransmetteur, les transmetteurs adrénergiques (catécholamines) stimulent aussi les glandes exocrines.

La régulation de la sudation est, pour de nombreux aspects, analogue à celle du débit sanguin cutané. L'une et l'autre ont des caractéristiques similaires de mise en route (seuil) et de dépendance linéaire à l'élévation de  $T_c$ . La sudation a tendance à être plus précoce dans le dos et au niveau du thorax et c'est pour ces régions que les pentes de la relation entre le débit sudoral local et  $T_c$  sont les plus fortes. Comme le débit sanguin cutané, la sudation est modifiée par des facteurs non thermiques, tels que l'hydratation et l'hyperosmolalité. Il convient aussi de noter un phénomène appelé «hydroméiose» qui survient dans les milieux très humides ou sur les régions de la peau constamment recouvertes de vêtements humides. Ces régions, continuellement humides, ont un débit sudoral réduit. Il s'agit d'un mécanisme de protection contre la déshydratation, puisque la sueur qui reste sur la peau, au lieu de s'évaporer, n'a pas de fonction de refroidissement.

Si le débit sudoral est adapté, le refroidissement par évaporation est finalement déterminé par le gradient de pression de vapeur d'eau entre la peau humide et l'air ambiant. Ainsi, l'humidité élevée et les vêtements lourds ou imperméables limitent

ce refroidissement, tandis qu'un air sec, le mouvement de l'air autour du corps et des vêtements poreux réduits au minimum, facilitent l'évaporation. D'autre part, s'il s'agit d'un travail de force et si la sudation est abondante, le refroidissement par évaporation peut également être limité par la capacité qu'a le corps de produire de la sueur (maximum 1 à 2 litres/h).

### La régulation de la température dans le froid

Une différence importante dans la manière dont l'être humain réagit au froid par rapport à la chaleur réside dans le fait que son comportement joue un bien plus grand rôle dans la réponse au froid en vue de la régulation thermique. Par exemple, le fait de porter des vêtements appropriés et de prendre des postures qui réduisent la surface qui échange de la chaleur avec l'ambiance («blottissement») est bien plus important dans les conditions ambiantes froides qu'à la chaleur. Une seconde différence provient du plus grand rôle joué par les hormones durant l'exposition au froid, avec notamment l'augmentation de la sécrétion de catécholamines (norépinéphrine et épinéphrine) et d'hormones thyroïdiennes.

### La vasoconstriction cutanée

Une stratégie efficace contre la déperdition thermique par le corps liée au rayonnement et à la convection consiste à accroître l'isolation effective fournie par l'écorce. Chez l'être humain, cela se produit par diminution du débit sanguin cutané — c'est-à-dire par vasoconstriction cutanée. La constriction des vaisseaux cutanés est plus prononcée dans les extrémités qu'au niveau du tronc. De même que la vasodilatation active, la vasoconstriction cutanée est commandée par le système nerveux sympathique et est influencée par  $T_c$ ,  $T_{sk}$ , ainsi que par les températures locales.

L'effet du refroidissement cutané sur la fréquence cardiaque et la tension artérielle varie selon la région du corps qui est refroidie et si le refroidissement est suffisamment intense pour provoquer une douleur. Par exemple, si les mains sont immergées dans de l'eau froide, la fréquence cardiaque, la tension artérielle systolique et la tension artérielle diastolique augmentent. Lorsque le visage est refroidi, les tensions artérielles systolique et diastolique s'élèvent à cause de la réponse sympathique générale, alors que la fréquence cardiaque diminue à cause d'un réflexe parasympathique (LeBlanc, 1975). La réponse globale au froid est d'autant plus complexe que les réponses varient largement d'une personne à l'autre. Si le stress causé par le froid est suffisamment important pour abaisser la température centrale, la fréquence cardiaque peut s'accroître (à cause de l'activation sympathique) ou décroître (à cause de l'augmentation du volume sanguin circulant).

Un cas spécifique est celui de la vasodilatation induite par le froid. Si les mains sont placées dans de l'eau froide, le débit sanguin cutané diminue initialement afin de conserver la chaleur. Lorsque la température des tissus diminue, le débit sanguin cutané augmente paradoxalement, puis s'abaisse à nouveau et ce cycle se répète. Il a été suggéré que la vasodilatation induite par le froid a un effet favorable empêchant l'altération des tissus sous l'effet du gel, mais cela n'a pas été prouvé. Sur le plan mécanique, la dilatation temporaire se produit probablement lorsque les effets directs du froid sont suffisamment sévères pour réduire la transmission nerveuse, ce qui annule temporairement l'action du froid sur les récepteurs sympathiques des vaisseaux sanguins (médiateurs de l'effet constricteur).

### Les frissons thermiques

Au fur et à mesure que le refroidissement du corps progresse, les frissons constituent une seconde ligne de défense. Le frisson est une contraction involontaire et aléatoire des fibres musculaires superficielles, ce qui ne limite pas la déperdition thermique, mais accroît la production de chaleur. Comme ces contractions ne

produisent pas de travail, seule de la chaleur est produite. Une personne au repos peut multiplier sa production de chaleur métabolique par trois ou quatre pendant des frissons intenses et peut élever sa  $T_c$  de 0,5 °C. Les signaux qui provoquent le début des frissons proviennent principalement de la peau et, en plus de la zone préoptique de l'hypothalamus antérieur, l'hypothalamus postérieur joue un rôle également.

Bien que de nombreux facteurs individuels contribuent aux frissons (et à la tolérance au froid en général), l'embonpoint représente un facteur important. Un homme ayant une couche adipeuse sous-cutanée très mince (2 à 3 mm d'épaisseur) commence à frissonner après 40 minutes à 15 °C et 20 minutes à 10 °C, tandis qu'un autre ayant une couche adipeuse plus isolante (11 mm) peut ne pas frissonner du tout à 15 °C et frissonner après 60 minutes à 10 °C (LeBlanc, 1975).

## ● LES EFFETS DE LA CONTRAINTE THERMIQUE ET DU TRAVAIL À LA CHALEUR

*Bodil Nielsen*

Lorsqu'une personne est exposée à des conditions ambiantes chaudes, ses mécanismes physiologiques de déperdition thermique s'activent afin de maintenir la température normale du corps. Les flux de chaleur entre le corps et l'environnement dépendent de la différence de température entre l'air ambiant et des objets tels que murs ou fenêtres, et la température cutanée de la personne.

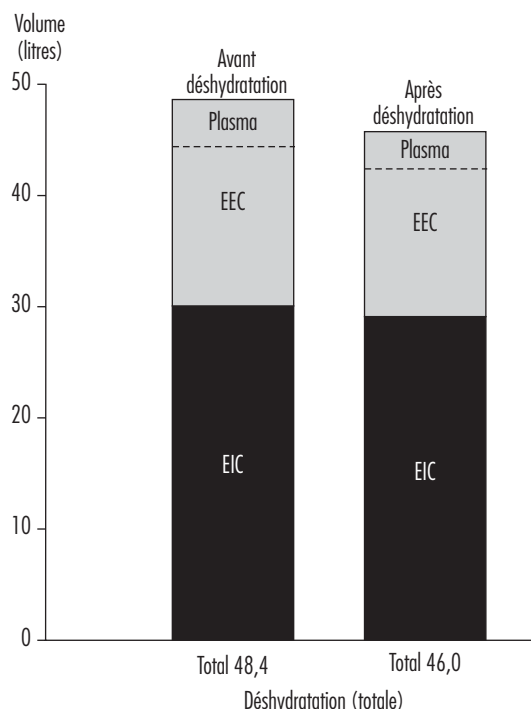
Cette température cutanée est régulée par des mécanismes physiologiques tels que les variations de l'irrigation de la peau, et par l'évaporation de la sueur sécrétée par les glandes sudoripares. La personne peut aussi changer de vêtements pour modifier l'échange thermique avec l'environnement. Plus les conditions ambiantes sont chaudes, plus la différence entre les températures ambiantes et la température de la peau ou des vêtements est faible. Cela signifie que «l'échange thermique sec» par convection et rayonnement est moindre lorsqu'il fait chaud que lorsqu'il fait froid. Si les températures ambiantes sont supérieures à la température de la surface du corps, cet environnement apporte de la chaleur. Cette chaleur supplémentaire, ainsi que celle qui est

Tableau 42.1 • Concentrations d'électrolytes dans le plasma sanguin et la sueur

Electrolytes et autres substances	Concentrations plasmatiques (g par litre)	Concentrations dans la sueur (g par litre)
Sodium (Na <sup>+</sup> )	3,5	0,2-1,5
Potassium (K <sup>+</sup> )	0,15	0,15
Calcium (Ca <sup>++</sup> )	0,1	faibles quantités
Magnésium (Mg <sup>++</sup> )	0,02	faibles quantités
Chlore (Cl <sup>-</sup> )	3,5	0,2-1,5
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,5	faibles quantités
Protéines	70	0
Graisses, glucose, petits ions	15-20	faibles quantités

Source: d'après Vellar, 1969.

Figure 42.2 • Répartitions calculées de l'eau dans le compartiment extracellulaire (EEC) et dans le compartiment intracellulaire (EIC) avant et après 2 heures de déshydratation par exercice à une température ambiante de 30 °C



Source: Nielsen et coll., 1986.

libérée par les processus métaboliques doivent être dissipées par évaporation de sueur, afin de maintenir la température du corps. L'évaporation de la sueur est donc d'autant plus importante que la température ambiante s'élève et il n'est pas surprenant que la ventilation et l'humidité de l'air (pression de vapeur d'eau) constituent des facteurs ambiants critiques lorsqu'il fait chaud. Si l'humidité est élevée, il y a production de sueur, mais celle-ci s'évapore moins. Dans ce cas, elle n'a pas d'effet de refroidissement; elle part en gouttes et ne sert plus à la régulation thermique.

Le corps humain contient approximativement 60% d'eau, soit 35 à 40 litres chez l'adulte. Un tiers environ de l'eau de l'organisme, le liquide extracellulaire, est réparti entre les cellules et le système vasculaire (le plasma sanguin). Les deux tiers restants, ou liquide intracellulaire, se situent à l'intérieur des cellules. La composition et le volume des compartiments d'eau du corps sont très précisément contrôlés par les mécanismes hormonaux et nerveux. La sueur est sécrétée par les millions de glandes sudoripares situées à la surface de la peau lorsque le centre de régulation thermique est activé par une élévation de la température du corps. La sueur contient du sel (NaCl, chlorure de sodium), mais dans une moindre mesure que le liquide extracellulaire. Ainsi, après sudation, l'eau et le sel sont perdus et doivent être remplacés.

### Les effets de la déperdition de sueur

Dans des conditions ambiantes neutres, confortables, on ne perd que de faibles quantités d'eau par diffusion à travers la peau. En revanche, pendant un travail pénible dans la chaleur, de grandes quantités de sueur peuvent être sécrétées par activation des glan-

des sudoripares, soit au maximum plus de 2 litres/h pendant plusieurs heures. Même une déperdition de sueur ne dépassant pas 1% du poids du corps ( $\approx 600$  à  $700$  ml) a déjà un effet mesurable sur la capacité d'exécuter le travail. Cet effet se manifeste par une élévation de la fréquence cardiaque (celle-ci augmente d'environ 5 battements par minute pour chaque point de pourcentage de perte hydrique du corps) et par une élévation de la température centrale. Si le travail se poursuit, la température du corps s'élève progressivement et peut atteindre près de  $40$  °C; à cette température, la chaleur peut provoquer des troubles, notamment par déperdition de liquide du système vasculaire (voir figure 42.2). Une déperdition d'eau du plasma sanguin réduit la quantité de sang contenue dans les veines centrales et le cœur. Par conséquent, chaque battement cardiaque pompant un plus faible volume systolique, le débit cardiaque (quantité de sang expulsée du cœur par minute) a tendance à diminuer et la fréquence cardiaque doit s'accroître afin de maintenir la circulation et la tension artérielle.

Un système physiologique de contrôle appelé système réflexe barorécepteur maintient, dans toutes les conditions, le débit cardiaque et la tension artérielle près de la normale. Les réflexes impliquent les récepteurs et les capteurs situés dans le cœur et dans le système artériel (aorte et carotides), qui contrôlent le degré de dilatation du cœur et des vaisseaux par le sang qui les remplit. Les impulsions qui en proviennent se transmettent, par les nerfs, au système nerveux central à partir duquel des ajustements, en cas de déshydratation, provoquent une constriction des vaisseaux sanguins et une réduction de l'irrigation des organes splanchniques (foie, intestin, reins) et de la peau. Ainsi, la circulation disponible est redistribuée pour favoriser l'irrigation des muscles qui travaillent et celle du cerveau (Rowell, 1986).

Une déshydratation sévère peut entraîner un épuisement physique dû à la chaleur et une défaillance circulatoire; dans ce cas, le sujet ne peut pas conserver sa tension artérielle et, de ce fait, s'évanouit. Les symptômes du coup de chaleur sont l'épuisement physique, souvent accompagné de céphalées, d'étourdissements et de nausées. La cause principale du coup de chaleur est la défaillance circulatoire due à la déperdition hydrique du système vasculaire. La diminution du volume sanguin provoque des réflexes qui réduisent l'irrigation des intestins et de la peau. La réduction de l'irrigation cutanée aggrave le processus en cours, puisque la déperdition thermique par la surface diminue; donc, la température centrale continue à s'élever. La baisse de la tension artérielle et la faible irrigation du cerveau qui en résultent peuvent entraîner l'évanouissement du sujet. La position allongée améliore l'apport de sang au cœur et au cerveau et, après refroidissement du corps et ingestion d'un peu d'eau, le sujet retrouve presque immédiatement son bien-être.

Si les processus responsables de l'épuisement dû à la chaleur s'emballent, un coup de chaleur se produit. Sous l'effet de la diminution progressive de la circulation cutanée, la température s'élève de plus en plus, entraînant une réduction et même un arrêt de la sudation et une élévation encore plus rapide de la température centrale, ce qui provoque un collapsus cardio-vasculaire pouvant être mortel ou une altération irréversible du cerveau. Des transformations dans le sang (osmolalité élevée, pH bas, hypoxie, adhérence cellulaire des érythrocytes, coagulation intravasculaire, par exemple), ainsi qu'une altération du système nerveux s'observent chez les patients victimes d'un coup de chaleur. La diminution de l'irrigation intestinale durant la contrainte thermique peut provoquer des détériorations tissulaires et des substances (endotoxines) peuvent être libérées et entraîner de la fièvre liée au coup de chaleur (Hales et Richards, 1987). Le coup de chaleur est un cas d'urgence aiguë, mettant la vie en danger. Il est examiné plus en détail dans l'article intitulé «Les troubles provoqués par la chaleur».

En même temps que la perte hydrique, la sudation provoque une perte d'électrolytes, principalement du sodium ( $\text{Na}^+$ ) et du chlore ( $\text{Cl}^-$ ), mais également à un moindre degré du magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ), du potassium ( $\text{K}^+$ ), etc. (voir tableau 42.1). La sueur contient moins de sel que les compartiments liquidiens du corps. Cela signifie que ceux-ci deviennent plus salés après transpiration. Cette salinité accrue semble avoir un effet sur la circulation par des effets sur le muscle lisse qui contrôle le degré d'ouverture des vaisseaux. Cependant, plusieurs chercheurs ont montré que cette salinité perturbe la capacité de transpirer, si bien qu'il faut une température plus élevée du corps pour stimuler les glandes sudoripares — dont la sensibilité est affaiblie (Nielsen, 1984). Si la sueur perdue n'est remplacée que par de l'eau, le taux de chlorure de sodium peut diminuer (hypo-osmolarité). Il en résulte des crampes dues au dysfonctionnement neuromusculaire, état désigné autrefois par l'expression «crampes du mineur» ou «crampes du chauffeur». Un moyen de le prévenir consiste à ajouter du sel au régime alimentaire (au Royaume-Uni, dans les années vingt, on conseillait de boire de la bière!).

La diminution de l'irrigation cutanée et la baisse de l'activité des glandes sudoripares affectent toutes deux la régulation thermique et la déperdition de chaleur, si bien que la température centrale s'élève plus en état de déshydratation qu'en état d'hydratation normale.

Nombreux sont les secteurs professionnels où les travailleurs sont exposés à une contrainte thermique extérieure — les travailleurs des aciéries, des industries du verre, des papeteries, des boulangeries, de l'exploitation minière, par exemple. Les ramoneurs et les sapeurs-pompiers le sont également, de même que les personnes qui travaillent dans des espaces confinés, des véhicules, des navires ou des avions. A noter aussi que les travailleurs qui sont équipés de vêtements de protection ou qui exécutent un travail de force dans des vêtements imperméables peuvent être victimes d'épuisement physique dû à la chaleur même lorsque la température ambiante est modérée ou fraîche. Les effets indésirables de la contrainte thermique se produisent lorsque la température centrale du corps est élevée et que la sudation est forte.

### La réhydratation

On peut combattre les effets de la déshydratation causée par une déperdition due à la sudation en buvant la quantité nécessaire pour remplacer la sueur. C'est ce que l'on fait généralement pendant le temps de récupération après le travail et l'effort. Cependant, durant un travail prolongé dans des conditions ambiantes chaudes, le fait de boire améliore la performance. Il est donc conseillé de boire dès que l'on a soif.

Mais là se posent quelques problèmes essentiels. L'un est que l'envie de boire n'est pas assez intense pour remplacer l'élimination d'eau qui se produit simultanément; ensuite, le temps nécessaire pour remplacer un important déficit en eau est très long, soit plus de 12 heures. Enfin, la vitesse à laquelle l'eau peut passer de l'estomac (où elle est en réserve) à l'intestin, où a lieu l'absorption, est limitée. Cette vitesse est inférieure à celle de la sudation observée durant l'effort à la chaleur.

De nombreuses études ont été faites sur les diverses boissons capables de rétablir les réserves d'eau, d'électrolytes et d'hydrates de carbone chez les sportifs durant des efforts prolongés. Les principaux résultats sont les suivants:

- La quantité de fluide qui peut être utilisée — c'est-à-dire transportée par l'estomac à l'intestin — est limitée par la «vitesse de l'évacuation gastrique», dont le maximum est d'environ  $1\ 000$  ml/h.
- Si le fluide est «hyperosmotique» (contenant des ions/molécules à des taux supérieurs au taux sanguin), la vitesse se ralentit. D'autre part, les «liquides iso-osmotiques» (contenant de l'eau

et des ions/molécules aux mêmes concentrations et à la même osmolarité que le sang) traversent à la même vitesse que l'eau pure.

- L'addition de petites quantités de sel et de sucre accroît la vitesse de captage de l'eau de l'intestin (Maughan, 1991).

De ce fait, chacun peut composer son propre «liquide de réhydratation» ou faire un choix parmi de nombreux produits du commerce. Normalement, boire pendant les repas rétablit l'équilibre en eau et en électrolytes. Les travailleurs ou les sportifs qui transpirent beaucoup devraient être encouragés à boire plus qu'ils n'en ont envie. La sueur contient environ 1 à 3 g de NaCl par litre. Cela signifie que des pertes hydriques de plus de 5 litres par jour par la sudation peuvent entraîner un déficit en chlorure de sodium, sauf apport d'un complément alimentaire.

Il est conseillé aussi aux travailleurs et sportifs de contrôler leur équilibre en eau en se pesant régulièrement — par exemple, le matin (à la même heure et dans le même état) — et de s'efforcer de conserver un poids constant. Cependant, une variation pondérale ne reflète pas forcément le degré d'hypohydratation. L'eau est chimiquement liée au glycogène, constituant la réserve d'hydrates de carbone dans les muscles, et libérée lorsque le glycogène est utilisé durant l'exercice. Des variations pondérales atteignant au maximum environ 1 kg peuvent se produire en fonction de la teneur de l'organisme en glycogène. Le poids du corps — d'un matin à l'autre — présente aussi des fluctuations dues aux «variations biologiques» dans la teneur en eau — par exemple, 1 à 2 kg d'eau peuvent être retenus durant la phase prémenstruelle chez la femme («syndrome prémenstruel»).

### La régulation de l'eau et des électrolytes

Le volume des compartiments de l'organisme contenant de l'eau — c'est-à-dire les volumes de liquide extracellulaire et intracellulaire — et leurs taux d'électrolytes restent constants grâce à un équilibre régulé entre l'apport et les pertes hydriques des substances.

L'eau provient de l'apport d'aliments et de liquide, mais une partie est libérée par les processus métaboliques, notamment par la combustion des graisses et des hydrates de carbone d'origine alimentaire. Les poumons éliminent de l'eau pendant la respiration, l'air inspiré absorbant leur eau sur les surfaces humides des voies supérieures avant d'être exhalé. L'eau diffuse à travers la peau en petite quantité dans des conditions confortables au repos. Cependant, pendant la sudation, l'eau peut être éliminée à des vitesses dépassant 1 à 2 litres/h pendant plusieurs heures. La teneur de l'organisme en eau est régulée. L'accroissement de l'élimination de l'eau par la sudation est compensé par la boisson et par une réduction de la formation d'urine, tandis que l'eau en excès est excrétée grâce à une production plus abondante d'urine.

Cette régulation aussi bien de l'apport que de l'élimination de l'eau est effectuée par le système nerveux sympathique et par les hormones. La soif, qui accroît l'apport en eau et l'élimination de l'eau par les reins, est régulée; le volume de l'urine, de même que sa composition en électrolytes, sont sous contrôle. Les capteurs du mécanisme de régulation se trouvent dans le cœur, où ils répondent à la «réplétion» du système vasculaire. Si le remplissage du cœur est réduit — par exemple, après une déperdition par sudation —, les récepteurs signalent ce message aux centres cérébraux responsables de la sensation de soif, ainsi qu'aux régions qui déclenchent une libération d'hormone antidiurétique par l'hormone posthypophysaire. Cette hormone a pour effet de réduire le volume d'urine.

De même, des mécanismes physiologiques régulent la composition en électrolytes des liquides de l'organisme par des processus qui ont lieu dans les reins. Les aliments contiennent des nutriments, des minéraux, des vitamines et des électrolytes. Dans le

présent contexte, c'est l'apport de chlorure de sodium qui est important. L'apport de sodium par les aliments varie selon les habitudes alimentaires, allant de 10 à 20 ou 30 g par jour. Cette quantité est normalement bien supérieure à celle qui est nécessaire; par conséquent, l'excédent est excrété par les reins, contrôlé par l'action de multiples mécanismes hormonaux (angiotensine, aldostérone, ANF, etc.) qui sont commandés par des stimuli envoyés par les osmorécepteurs du cerveau et des reins, répondant à l'osmolarité avant tout de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Cl}^-$ , respectivement, dans le sang et les liquides filtrés par les reins.

### Les différences interindividuelles et ethniques

On peut penser que la réaction à la chaleur présente des différences entre hommes et femmes ainsi qu'entre personnes jeunes et âgées. Ces différences se manifestent par certains paramètres agissant sur le transfert thermique, comme la surface corporelle, le rapport taille/poids, l'épaisseur de la couche de graisse sous-cutanée ayant un effet d'isolation, ainsi que par la capacité physique de produire un travail et de la chaleur (capacité aérobie  $\approx$  consommation maximale d'oxygène). Les données disponibles permettent de considérer que la tolérance à la chaleur est réduite chez les personnes âgées. Celles-ci commencent à transpirer plus tardivement que les individus jeunes et elles réagissent par une irrigation cutanée plus intense durant l'exposition à la chaleur.

D'après la comparaison entre sexes, les femmes tolèrent mieux la chaleur humide que les hommes. Dans un milieu chaud et humide, la sueur s'évapore moins, si bien que le rapport surface/masse corporelle, qui est légèrement plus important chez la femme, pourrait être à son avantage. Cependant, la capacité aérobie représente un important facteur à prendre en compte pour comparer des individus exposés à la chaleur. Dans les conditions de laboratoire, les tests auprès de catégories de sujets ayant la même capacité physique de travail («consommation maximale d'oxygène» —  $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) — par exemple, des hommes jeunes et des hommes plus âgés ou des hommes par rapport à des femmes (Pandolf et coll., 1988) donnent des réponses physiologiques similaires à la chaleur. Dans ce cas, un certain effort (exercice sur bicyclette ergométrique) entraînera la même charge pour le système circulatoire — c'est-à-dire la même fréquence cardiaque et la même élévation de la température centrale —, indépendamment de l'âge et du sexe.

Les mêmes considérations sont valables pour la comparaison entre groupes ethniques. La prise en compte des différences de taille et de capacité aérobie ne met pas en évidence des différences significatives liées à la race. Mais, dans la vie quotidienne en général, les personnes plus âgées ont en moyenne une  $\text{VO}_{2\text{max}}$  inférieure à celle des personnes plus jeunes et les femmes une  $\text{VO}_{2\text{max}}$  inférieure à celle des hommes dans la même tranche d'âge.

Par conséquent, lorsqu'il exécute une tâche spécifique d'une charge absolue déterminée (mesurée par exemple en watts), un sujet ayant une plus faible capacité aérobie aura une fréquence cardiaque et une température corporelle plus élevées et sera moins apte à faire face à la contrainte supplémentaire exercée par la chaleur extérieure qu'un autre ayant une  $\text{VO}_{2\text{max}}$  plus élevée.

Plusieurs indices de contrainte thermique ont été établis pour les besoins de la sécurité et de la santé au travail. Ces indices tiennent compte de la grande variation de la réponse à la chaleur et à l'effort entre individus, ainsi que des milieux ambiants chauds spécifiques pour lesquels ces indices ont été conçus. Ils sont examinés plus loin dans ce chapitre.

Les personnes exposées de manière répétée à la chaleur la tolèrent mieux après quelques jours seulement. Elles sont acclimatées. Leur taux de sudation a augmenté et le refroidissement de la peau qui en résulte abaisse la température centrale et la fréquence cardiaque durant l'effort dans les mêmes conditions.

C'est pourquoi un acclimatement artificiel du personnel devant être exposé à une chaleur extrême (sapeurs-pompiers, secouristes, militaires) sera probablement bénéfique pour réduire l'astreinte physiologique.

En résumé, plus une personne produit de la chaleur, plus il lui faut en dissiper. Dans un milieu chaud, l'évaporation de sueur constitue le facteur limitant la déperdition thermique. Les différences dans la capacité sudorale sont considérables entre individus. Alors que certaines personnes sont totalement dépourvues de glandes sudoripares, dans la plupart des cas, la quantité de sueur produite au cours d'un test standard de contrainte thermique augmente avec l'entraînement physique et l'exposition répétée à la chaleur. La contrainte thermique entraîne une élévation de la fréquence cardiaque et de la température centrale. Une fréquence cardiaque maximale et une température centrale d'environ 40 °C représentent la limite physiologique absolue pour que le travail soit performant dans un milieu chaud (Nielsen, 1994).

## ● LES TROUBLES PROVOQUÉS PAR LA CHALEUR

*Tokuo Ogawa*

Une température ambiante élevée, une humidité élevée, un exercice intense ou un obstacle à la dissipation de la chaleur peuvent provoquer divers troubles. Il s'agit de troubles systémiques, à savoir syncope, œdème, crampes, échauffement et coup de chaleur, et de troubles locaux sous forme de lésions cutanées.

### Les troubles systémiques

Les crampes, l'épuisement dû à la chaleur et le coup de chaleur sont cliniquement importants. Les mécanismes qui donnent lieu à ces troubles systémiques sont l'insuffisance circulatoire, le déséquilibre en eau et en électrolytes et l'hyperthermie (température élevée du corps). Le plus grave de ces troubles est le coup de chaleur qui peut entraîner la mort en l'absence d'un traitement rapide et adapté.

Deux catégories distinctes de personnes risquent l'apparition de troubles dus à la chaleur, exception faite des nourrissons. La première catégorie, la plus importante, est celle des personnes âgées, en particulier lorsqu'elles sont démunies ou qu'elles présentent des états pathologiques chroniques, comme diabète sucré, obésité, malnutrition, insuffisance cardiaque globale, alcoolisme chronique, démence et nécessité de prendre des médicaments qui perturbent la régulation thermique. La seconde catégorie comprend des individus sains qui tentent un effort physique prolongé ou sont exposés à une contrainte thermique excessive. Les facteurs qui prédisposent les individus jeunes actifs à des troubles provoqués par la chaleur, autres qu'un dysfonctionnement congénital et acquis des glandes sudoripares, sont la mauvaise forme physique, le manque d'acclimatation, la faible efficacité de l'effort et un rapport surface/masse corporelle réduit.

### La syncope

La syncope est une perte temporaire de conscience provoquée par une diminution de l'irrigation cérébrale, fréquemment précédée par la pâleur, une vision floue, des vertiges et des nausées. Elle peut se produire chez des personnes exposées à une contrainte thermique. L'expression *collapsus provoqué par la chaleur* est synonyme de *syncope provoquée par la chaleur*. Les symptômes sont attribués à la vasodilatation cutanée, à l'accumulation posturale de sang avec, en conséquence, une diminution du retour veineux au

cœur et un débit cardiaque réduit. Une légère déshydratation, qui se produit chez la plupart des personnes exposées à la chaleur, accroît la probabilité de syncope. Les sujets qui souffrent de maladies cardio-vasculaires ou qui ne sont pas acclimatés sont prédisposés à la syncope. En général, les victimes reprennent rapidement conscience après avoir été placées en position allongée.

### L'œdème

Un léger œdème déclive — c'est-à-dire le gonflement des mains et des pieds — peut apparaître chez des sujets non acclimatés exposés à un milieu ambiant chaud. Il se produit généralement chez la femme, disparaît avec l'acclimatation et s'atténue après plusieurs heures lorsque le patient est placé dans un endroit frais.

### Les crampes

Les crampes peuvent survenir après une sudation abondante provoquée par un travail physique prolongé. Des spasmes douloureux se produisent dans les muscles des membres et les muscles abdominaux soumis à un travail intensif et à la fatigue, tandis que la température du corps s'élève légèrement. Ces crampes sont provoquées par la carence en sel qui apparaît si la perte hydrique due à une transpiration abondante pendant un long moment est compensée par de l'eau pure non additionnée de sel et si la natrémie est descendue au-dessous du niveau critique. En elles-mêmes, ces crampes sont relativement sans danger. Elles surviennent chez des sujets physiquement sains, capables d'un exercice physique soutenu et ont été appelées autrefois «crampes du mineur» ou «crampes du coupeur de canne à sucre», étant donné leur fréquente apparition chez ces travailleurs.

Les moyens de faire disparaître les crampes consistent à cesser l'activité, rester au repos dans un endroit frais et reconstituer le liquide, ainsi que les électrolytes, en évitant toute exposition à la chaleur pendant au moins 24 à 48 heures.

### L'épuisement thermique

L'épuisement thermique est le trouble dû à la chaleur le plus communément observé sur le plan clinique. Il résulte d'une sévère déshydratation après une très importante sudation. Il se produit généralement chez des sujets jeunes, par ailleurs en bonne santé, qui pratiquent des exercices physiques prolongés (épuisement physique provoqué par l'exercice), tels que marathoniens, sportifs de plein air, recrues militaires, mineurs et travailleurs du bâtiment. Ce trouble se caractérise avant tout par une déficience circulatoire due à la déplétion d'eau ou la déperdition de sel. Il peut être considéré comme un stade initial du coup de chaleur et, en l'absence de traitement, peut finalement évoluer jusqu'à celui-ci. Il est d'usage de le diviser en deux types: l'épuisement thermique par perte hydrique et par déperdition de sel; néanmoins, dans de nombreux cas, il s'agit d'un mélange de ces deux types.

L'épuisement physique par perte hydrique provient d'une sudation abondante prolongée et d'une insuffisance de l'apport d'eau. Comme la sueur contient des ions sodium à un taux allant de 30 à 100 milliéquivalents par litre, soit moins que le plasma, une sudation importante entraîne une hypohydratation (réduction de la teneur en eau du corps) et une hypernatrémie (élévation du taux de sodium dans le sang). L'épuisement thermique se caractérise par la soif, la faiblesse, la fatigue, des vertiges, une anxiété, une oligurie (diminution de la quantité d'urine), une tachycardie (battements cardiaques rapides) et une hyperthermie modérée (39 °C ou plus). La déshydratation entraîne également une diminution de la sudation, une élévation de la température de la peau, de la protéinémie, de la natrémie et de la valeur de l'hématocrite (rapport du volume cellulaire sanguin au volume sanguin total).

Le traitement consiste à mettre la victime au repos en position allongée, les genoux surélevés, dans un endroit frais, à lui passer

une serviette ou une éponge fraîches sur le corps et, pour compenser la perte hydrique, à la faire boire ou, en cas d'impossibilité d'ingestion, à pratiquer une perfusion intraveineuse. Les quantités nécessaires à la reconstitution de l'eau et du sel, de même que la température et le poids du corps doivent faire l'objet d'un contrôle minutieux. L'ingestion d'eau ne doit pas dépendre de la sensation subjective de soif de la victime, surtout si la perte hydrique est compensée par de l'eau simple, parce que la dilution du sang fait rapidement disparaître la soif et entraîne une diurèse, ce qui retarde le rétablissement de l'équilibre des liquides de l'organisme. Ce phénomène d'ingestion insuffisante d'eau est appelé la déshydratation volontaire. De plus, un apport d'eau sans sel peut compliquer les troubles dus à la chaleur, comme indiqué précédemment. Une déshydratation correspondant à plus de 3% du poids du corps devrait toujours être traitée par remplacement de l'eau et des électrolytes.

L'épuisement thermique dû à la déperdition de sel résulte d'une sudation abondante pendant une durée prolongée, du remplacement de l'eau en présence d'une carence en sel. Il est favorisé par une acclimatation incomplète, des vomissements, de la diarrhée, etc. Ce type d'épuisement apparaît généralement quelques jours après une perte hydrique. C'est chez les personnes âgées sédentaires exposées à la chaleur, qui ont bu abondamment de l'eau pour étancher leur soif, qu'il apparaît le plus communément. Les symptômes habituels sont: céphalées, vertiges, faiblesse, fatigue, nausées, vomissements, diarrhées, anorexie, spasmes musculaires et confusion mentale. Les analyses de sang indiquent une diminution du volume du plasma, une élévation de l'hématocrite et de la protéinémie, ainsi qu'une hypercalcémie (taux anormalement élevé de calcium dans le sang).

Il est indispensable de détecter et de traiter rapidement l'épuisement thermique dû à la chaleur, en plaçant le patient au repos en position allongée dans un endroit frais et en reconstituant l'eau et les électrolytes. L'osmolarité ou la densité de l'urine, l'urémie, la natrémie, la chlorémie, la température et le poids du corps doivent être contrôlés, l'apport d'eau et de sel doit être enregistré. Si le traitement est adapté, les victimes se rétablissent généralement en quelques heures et sans séquelle. Sinon, leur état peut évoluer jusqu'au coup de chaleur.

### **Le coup de chaleur**

Le coup de chaleur est un cas d'urgence médicale grave qui peut entraîner la mort. Il s'agit d'un état clinique complexe dans lequel une hyperthermie incontrôlable provoque des lésions tissulaires. Cette élévation de la température du corps est provoquée initialement par une sévère congestion thermique due à une charge thermique excessive, l'hyperthermie qui en résulte entraîne un dysfonctionnement du système nerveux central, avec défaillance du mécanisme normal de régulation thermique, ce qui accélère l'élévation de la température. Le coup de chaleur se produit en général sous deux formes: le coup de chaleur classique et celui qui est provoqué par l'effort. Le premier apparaît chez des sujets âgés ou très jeunes, obèses ou inaptes, qui entreprennent des activités normales durant une exposition prolongée à des températures ambiantes élevées, alors que le second se produit en particulier chez les adultes jeunes, actifs, durant un exercice physique épuisant. De plus, une forme mixte de coup de chaleur présente les caractéristiques de ces deux formes.

Les sujets âgés, surtout ceux souffrant d'une maladie chronique, telle que maladies cardio-vasculaires, diabète sucré ou alcoolisme, et ceux qui prennent certains médicaments, notamment des psychotropes, présentent un risque élevé de coup de chaleur classique. C'est ainsi que le taux de mortalité enregistré est près de dix fois plus élevé parmi les personnes de plus de 60 ans que parmi celles de 60 ans et moins durant les vagues de chaleur prolongées. Une mortalité aussi élevée parmi les personnes âgées a été égale-

ment enregistrée chez les musulmans durant le pèlerinage à La Mecque, la forme mixte de coup de chaleur étant la plus courante. Outre les maladies chroniques indiquées plus haut, les autres facteurs qui prédisposent les personnes âgées au coup de chaleur sont la diminution de la perception thermique, le ralentissement des réponses vasomotrices et sudorales aux variations de la contrainte thermique et une moindre capacité de s'acclimater à la chaleur.

Les sujets qui travaillent ou pratiquent des exercices pénibles dans des conditions chaudes et humides sont exposés à un grand risque de maladie due à la chaleur et à l'effort, qu'il s'agisse d'un épuisement lié à la chaleur ou d'un coup de chaleur. Les sportifs soumis à une activité physique intense peuvent être victimes d'une hyperthermie, car ils produisent une chaleur métabolique à un niveau élevé et, même lorsque les conditions ambiantes ne sont pas très chaudes, il est arrivé souvent qu'ils souffrent ainsi d'hyperthermie. Les sujets autres que les sportifs, relativement peu adaptés, présentent un moindre risque à cet égard; ils ont conscience de leurs capacités et limitent leurs exercices en conséquence. Toutefois, lorsqu'ils pratiquent des sports pour leurs loisirs, étant fortement motivés et enthousiastes, ils essaient souvent de s'exercer à une intensité qui dépasse leurs capacités, et ils peuvent succomber à des troubles provoqués par la chaleur (généralement épuisement thermique). Une mauvaise acclimatation, une hydratation non adaptée, des vêtements non appropriés, la consommation d'alcool et une maladie de la peau causant une anhydrose (réduction ou absence de sudation), en particulier une miliaire rouge (voir ci-après), contribuent à l'aggravation des symptômes.

Les enfants sont plus sensibles à l'épuisement thermique ou au coup de chaleur que les adultes. Ils produisent plus de chaleur métabolique par unité de masse et sont moins aptes à dissiper la chaleur en raison de leur capacité relativement faible à transpirer.

### **Les manifestations cliniques du coup de chaleur**

Trois critères définissent le coup de chaleur:

1. forte hyperthermie avec température centrale (température profonde) dépassant généralement 42 °C;
2. troubles du système nerveux central;
3. peau chaude, sèche, avec arrêt de la sudation.

Le diagnostic de coup de chaleur est facile à établir si ces trois critères sont réunis. Toutefois, il est plus difficile lorsque l'un de ceux-ci est absent, obscur ou non décelé. Par exemple, si la température centrale n'est pas mesurée correctement et immédiatement, il est possible qu'une forte hyperthermie ne soit pas détectée; ou, au stade précoce d'un coup de chaleur provoqué par l'effort, la sudation peut persister ou même être plus abondante et la peau peut être humide.

Le coup de chaleur survient généralement de manière soudaine et sans symptômes précurseurs, mais certains patients chez lesquels un coup de chaleur est imminent peuvent présenter des symptômes et des signes de dysfonctionnement du système nerveux central, à savoir céphalées, nausées, vertiges, faiblesses, somnolence, confusion, anxiété, désorientation, apathie, agressivité et comportement irrationnel, tremblement, fibrillation et convulsion. Après l'apparition du coup de chaleur, les troubles du système nerveux central sont présents dans tous les cas. Le niveau de conscience est souvent abaissé, un coma profond étant très fréquent. Des crises se produisent dans la majorité des cas, surtout chez les sujets physiquement en forme. Les signes de dysfonctionnement cérébelleux sont importants et peuvent persister. Un myosis extrême est fréquemment observé. Une ataxie cérébelleuse (absence de coordination musculaire), une hémiplégié (paralysie d'un côté du corps), une aphasie et une instabilité émotionnelle peuvent persister chez certains survivants.

Les vomissements et la diarrhée sont fréquents. Une tachypnée (respiration rapide) est généralement présente initialement et le pouls peut être faible et rapide. L'hypotension, l'une des complications les plus communes, provient de la déshydratation marquée, de l'importante vasodilatation périphérique et de la dépression éventuelle du muscle cardiaque. Une insuffisance rénale aiguë peut s'observer dans les cas sévères, notamment en cas de coup de chaleur provoqué par des efforts.

Des hémorragies se produisent dans tous les organes parenchymateux, sur la peau (les pétéchies), dans le tube digestif lors des cas sévères. Les manifestations hémorragiques cliniques sont: mélaena (matières fécales de couleur noire, ayant l'aspect du goudron), hématurie (vomissement de sang), hématurie (émission d'urine contenant du sang), hémoptysie (crachats sanglants), épistaxis (saignement de nez), purpura (taches cutanées violacées), ecchymoses (taches noirâtres ou bleutées) et hémorragie de la conjonctive. La coagulation intravasculaire est fréquente. La diathèse hémorragique (tendance au saignement) est généralement associée à une coagulation intravasculaire disséminée. La coagulation intravasculaire disséminée se produit de façon prépondérante dans les cas de coup de chaleur provoqués par l'effort, où il y a accroissement de l'activité fibrinolytique (dissolution des caillots sanguins) du plasma. D'autre part, une diminution des plaquettes, une augmentation du temps de prothrombine, une déplétion des facteurs de coagulation et une élévation du taux des produits de dégradation de la fibrine sont provoquées par l'hyperthermie de tout le corps. Les patients chez lesquels la coagulation intravasculaire disséminée et le saignement sont évidents présentent une température centrale plus élevée, un abaissement de la tension artérielle, une diminution du pH et de  $PO_2$  dans le sang artériel, une fréquence augmentée d'oligurie ou d'anurie et de choc, ainsi qu'un taux de mortalité plus élevé.

Le choc est également une complication habituelle. Il est dû à la défaillance de la circulation périphérique et est aggravé par la coagulation intravasculaire disséminée, ce qui provoque une dissémination des caillots dans le système microcirculatoire.

#### Le traitement du coup de chaleur

Le coup de chaleur est un cas d'urgence médicale qui exige un diagnostic rapide et un traitement prompt et pertinent pour sauver la vie du patient. Il est obligatoire de bien mesurer la température centrale: par voie rectale ou œsophagienne au moyen d'un thermomètre allant jusqu'à 45 °C. Il faut éviter de prendre la température orale ou axillaire, car celle-ci peut présenter une grande différence avec la température centrale réelle.

L'objectif du traitement est d'abaisser la température du corps en réduisant l'effet thermique et en favorisant la dissipation de chaleur par la peau. Le traitement consiste à placer le patient dans un endroit calme, frais, ombragé et bien ventilé, à retirer les vêtements inutiles et à placer un ventilateur. Le rafraîchissement de la face et de la tête peut favoriser celui du cerveau.

L'efficacité de certaines techniques de rafraîchissement a été contestée. Selon certains, la mise en place d'enveloppements humides et froids sur les troncs vasculaires, la nuque, l'aîne et les aisselles, l'immersion du corps dans de l'eau froide ou son recouvrement par des serviettes glacées peuvent favoriser les frissons et la vasoconstriction cutanée, empêchant ainsi l'efficacité du rafraîchissement. Autrefois, le traitement recommandé consistait à immerger le patient dans un bain d'eau très froide, avec massage vigoureux de la peau pour réduire au minimum la vasoconstriction cutanée, une fois le patient admis dans un établissement médicalisé. Cette méthode de rafraîchissement présente plusieurs inconvénients: difficultés pour le personnel qui doit administrer de l'oxygène et des liquides tout en contrôlant en permanence la tension artérielle ainsi que l'électrocardiogramme, et problèmes d'hygiène dus à la contamination du bain par les vomissements et

la diarrhée des patients comateux. Une autre solution consiste à pulvériser un brouillard froid sur le corps du patient tout en plaçant un ventilateur de manière à favoriser l'évaporation sur la peau. Cette méthode de rafraîchissement peut abaisser la température centrale de 0,03 à 0,06 °C par minute.

Les mesures de prévention des convulsions, des crises et des frissons doivent être prises immédiatement. Le contrôle cardiaque permanent, la détermination des taux sériques d'électrolytes et l'analyse des gaz du sang artériel et veineux sont indispensables; la perfusion intraveineuse de solutions d'électrolytes à une température relativement basse d'approximativement 10 °C, avec apport d'oxygène contrôlé, devraient commencer en temps voulu. L'intubation trachéale pour protéger les voies respiratoires, la mise d'un cathéter cardiaque pour évaluer la pression veineuse centrale, la mise en place d'une sonde gastrique et d'une sonde urinaire peuvent faire partie des mesures complémentaires recommandées.

#### La prévention du coup de chaleur

De nombreux facteurs humains — acclimatation, âge, constitution, état général de santé, apport d'eau et de sel, vêtements, particularités de la religion, ignorance des règlements en faveur de la santé publique, ou inobservation de ceux-ci — devraient être pris en compte pour prévenir le coup de chaleur.

Avant tout exercice physique dans des conditions ambiantes chaudes, les travailleurs, les sportifs ou les pèlerins devraient être informés de l'effort et du niveau de contrainte thermique qu'ils peuvent subir, ainsi que des risques de coup de chaleur. Une période d'acclimatation est recommandée avant toute activité physique intense ou exposition à une contrainte thermique élevée. Le niveau de l'activité devrait être adapté à la température ambiante, l'exercice physique évité ou tout au moins réduit au minimum durant les heures les plus chaudes de la journée. Le libre accès à l'eau est obligatoire durant l'exercice physique. Comme des électrolytes sont perdus par la transpiration et que la possibilité d'ingestion volontaire d'eau peut être limitée, retardant ainsi la compensation de la déshydratation d'origine thermique, les électrolytes devraient également être remplacés en cas de transpiration abondante. Une mesure importante consiste aussi à porter des vêtements adaptés. Ceux en tissu qui absorbent l'eau et sont perméables à l'air et à la vapeur d'eau facilitent la dissipation de chaleur.

#### Les troubles cutanés

La *miliaire* est le trouble cutané associé à la chaleur le plus commun. Elle apparaît lorsqu'une obstruction des conduits des glandes sudoripares empêche la sueur de parvenir à la surface de la peau. Un syndrome de rétention de la sueur apparaît si l'anhydrose (incapacité d'éliminer la sueur) est largement répandue à la surface du corps et prédispose le patient à un coup de chaleur.

La miliaire est généralement provoquée par l'exercice physique dans des conditions ambiantes chaudes et humides, par les maladies fébriles, l'application de compresses humides, de bandages, de plâtre coulé ou adhésif, et par le port de vêtements peu perméables. La miliaire peut être classée en trois types, selon la profondeur de la rétention de la sueur: la miliaire cristalline, la miliaire rouge et la miliaire profonde.

La miliaire cristalline est due à la rétention de sueur à l'intérieur ou juste au-dessous de la couche cornée de la peau, où des vésicules minuscules, transparentes, non inflammatoires, sont observées. Ces vésicules apparaissent généralement en «éruptions cutanées successives» après un coup de soleil grave ou durant une maladie fébrile. Par ailleurs, ce type de miliaire est sans symptôme, c'est la moins désagréable et elle disparaît spontanément en quelques jours, lorsque les vésicules se rompent pour laisser des squames.

La miliaire rouge apparaît lorsqu'une exposition intense à la chaleur provoque une sudation prolongée et abondante. Il s'agit du type le plus commun de miliaire, dans lequel la sueur s'accumule dans l'épiderme. Des papules, vésicules ou pustules rouges se forment, accompagnées de sensations de brûlure et de démangeaison (éruption sudorale). Le conduit de la glande sudoripare est obstrué dans sa portion terminale. Cette obstruction se forme sous l'action de bactéries aérobies, notamment des cocci, qui prolifèrent largement dans la couche cornée lorsque celle-ci est hydratée par la sueur. Ces bactéries sécrètent une toxine qui altère les cellules épithéliales cornées du conduit et provoque une réaction inflammatoire, en déclenchant la formation d'un cylindre dans le conduit de la glande. L'infiltration par les leucocytes crée un enclavement qui obstrue complètement le passage de la sueur durant plusieurs semaines.

Dans la miliaire profonde, la sueur est retenue dans le derme et produit des papules plates, inflammatoires, des nodules et des abcès, avec un prurit moindre que dans la miliaire rouge. Ce type de miliaire est généralement limité aux zones tropicales. Il peut se développer progressivement à partir de la miliaire rouge après des accès répétés de sudation abondante, car la réaction inflammatoire se propage à partir des couches supérieures de la peau vers les couches profondes.

*L'asthénie anhydrosique tropicale.* Cette expression est passée dans le langage courant durant la seconde guerre mondiale, lorsque les troupes déployées dans des régions tropicales souffraient d'éruption sudorale et d'intolérance à la chaleur. Il s'agit d'une modalité du syndrome de rétention de la sueur rencontré dans les milieux tropicaux chauds et humides. Elle se caractérise par une anhydrose et des éruptions semblables à la miliaire, accompagnées de symptômes de congestion due à la chaleur, tels que palpitations, pouls rapide, hyperthermie, céphalées, faiblesse et incapacité rapidement évolutive de supporter l'activité physique à la chaleur. Elle est généralement précédée d'une miliaire rouge largement répandue.

*Traitement.* Le traitement initial et essentiel de la miliaire et du syndrome de rétention de sueur consiste à placer la personne atteinte dans un endroit frais. Des douches froides, un séchage de la peau en douceur et l'application de lotion à la calamine peuvent atténuer sa souffrance. L'application de bactériostatiques empêche efficacement la propagation de la microflore et est préférable aux antibiotiques qui peuvent accroître la résistance de ces micro-organismes.

Les enclavements dans l'évacuation des glandes sudoripares disparaissent en 3 semaines par le renouvellement de l'épiderme.

## ● LA PRÉVENTION DE LA CONTRAINTE THERMIQUE

Sarah A. Nunmeley

Bien que les êtres humains possèdent une capacité considérable de compensation de la contrainte qu'ils subissent lorsqu'ils sont exposés à la chaleur naturelle, beaucoup de milieux professionnels ou d'activités physiques exposent les travailleurs à des charges thermiques excessives au point de menacer leur santé et de diminuer leur productivité. Cet article décrit plusieurs techniques possibles pour réduire la fréquence des troubles provoqués par la chaleur et la gravité des cas lorsqu'ils se produisent. Ces interventions peuvent être de cinq types: optimiser la tolérance à la chaleur chez les sujets exposés, assurer à temps le remplacement des pertes hydriques et des électrolytes, modifier les pratiques de

travail afin d'en réduire la contrainte thermique liée à l'effort, organiser le contrôle des conditions climatiques et porter des vêtements de protection.

Les facteurs extérieurs au lieu de travail qui peuvent avoir un effet sur la tolérance thermique ne doivent pas être ignorés lorsqu'on évalue le degré d'exposition et qu'on conçoit les stratégies de prévention. Par exemple, la charge physiologique totale et la prédisposition potentielle aux troubles liés à la chaleur seront plus élevées si le stress dû à la chaleur se prolonge au-delà des heures de travail, ou si on effectue des travaux annexes ou qu'on se livre à des activités fatigantes durant les loisirs ou du fait des conditions de vie dans des quartiers où la chaleur est permanente. De plus, la nutrition et l'hydratation sont souvent le reflet des modes d'alimentation et de boisson, qui peuvent également différer selon la saison ou les observances religieuses.

### Optimiser la tolérance individuelle à la chaleur

Les candidats à des métiers soumis à la chaleur doivent avoir un bon état de santé général et posséder des qualités physiques adaptées aux travaux à effectuer. L'obésité et les maladies cardio-vasculaires augmentent les risques; les sujets ayant déjà souffert d'une maladie inexpliquée ou répétitive lors d'une exposition à la chaleur ne devraient pas avoir à exécuter des tâches impliquant une contrainte thermique importante. Divers paramètres physiques et physiologiques qui peuvent affecter la tolérance à la chaleur sont examinés ci-après; ils entrent dans deux catégories générales: les caractéristiques inhérentes à la personne et qui sont hors de son contrôle, telles que taille, sexe, ethnie et âge, et les caractéristiques acquises, qui sont contrôlables au moins en partie et qui incluent l'aptitude physique, l'acclimatement à la chaleur, l'obésité, les conditions médicales et le stress du sujet.

Les travailleurs devraient être informés de la nature de la contrainte thermique à laquelle ils seront soumis et de ses effets indésirables, ainsi que des mesures de protection prévues sur le lieu de travail. Ils devraient savoir qu'un apport d'eau suffisant et un régime alimentaire équilibré permettent dans une large mesure de tolérer la chaleur. De plus, ils devraient connaître les signes et les symptômes des troubles provoqués par la chaleur, tels que vertiges, lipothymie, difficultés respiratoires, palpitations et soif extrême. Ils devraient aussi apprendre les bases des premiers secours et savoir où appeler pour obtenir de l'aide lorsqu'ils déclinent ces signes chez eux-mêmes ou chez d'autres.

La direction devrait mettre en place un système de déclaration des incidents provoqués par la chaleur sur le lieu de travail. L'apparition de troubles dus à la chaleur chez plusieurs personnes — ou de manière répétitive chez un même sujet — constitue souvent un avertissement qu'un trouble sérieux menace et qu'il importe d'évaluer aussitôt les conditions ambiantes et les mesures de prévention en vigueur.

### Les caractéristiques corporelles ayant un effet sur l'adaptation

*Mensurations.* Les enfants et les adultes très minces sont désavantagés à deux égards lorsqu'ils doivent exercer une activité dans des conditions ambiantes chaudes. Tout d'abord, un effort imposé de l'extérieur représente une charge relative plus importante pour un corps ayant une faible masse musculaire, avec une plus grande élévation de la température centrale du corps et l'apparition plus rapide de la fatigue. De plus, le rapport surface/masse corporelle qui est plus élevé chez les sujets minces constitue un inconvénient dans des conditions extrêmement chaudes. A eux tous, ces divers facteurs expliquent pourquoi on a observé que les hommes pesant moins de 50 kg présentaient un plus grand risque de troubles provoqués par la chaleur dans les activités minières à grande profondeur.

*Sexe.* Selon les premières études en laboratoire effectuées auprès de femmes, il avait semblé que celles-ci toléraient relativement

moins bien le travail à la chaleur que les hommes. Cependant, nous savons maintenant que, pour la plupart, ces différences peuvent s'expliquer par la taille et par les niveaux acquis de forme physique et d'acclimatement à la chaleur. On note toutefois des différences minimales entre sexes dans les mécanismes de dissipation de la chaleur: les débits sudoraux maximaux sont plus élevés chez l'homme et peuvent accroître leur tolérance aux conditions ambiantes extrêmement chaudes et sèches, tandis que la femme peut mieux supprimer la transpiration excessive et, par conséquent, conserver l'eau de son organisme; elle supporte donc mieux la chaleur dans des conditions ambiantes chaudes et humides. Bien que le cycle menstruel s'accompagne d'une variation de la température basale et modifie légèrement les réponses de régulation thermique chez la femme, ces ajustements physiologiques sont trop subtils pour avoir une influence sur la tolérance à la chaleur et sur l'efficacité de la régulation thermique dans les conditions de travail réelles.

Abstraction faite des caractéristiques corporelles et de forme physique individuelles, hommes et femmes ont des réponses pratiquement identiques à la contrainte thermique et s'acclimentent de la même façon au travail dans des conditions chaudes. Aussi, la sélection des travailleurs pour les travaux à la chaleur devrait-elle être faite en fonction de la santé et de la capacité physique, et non selon le sexe. Les sujets très menus ou sédentaires des deux sexes présentent une faible tolérance au travail à la chaleur.

L'effet de la grossesse sur la tolérance à la chaleur chez la femme n'est pas clairement établi, mais la modification des taux hormonaux et l'accroissement des exigences que le fœtus impose au système circulatoire de la mère peuvent accroître sa tendance à l'évanouissement. Une hyperthermie maternelle sévère (hyperpyrexie) due à une maladie semble accroître l'incidence de malformations fœtales, mais rien n'indique que le stress provoqué par le travail à la chaleur ait un effet similaire.

*Ethnie.* Bien que les divers groupes ethniques soient originaires de différents climats, il existe peu de signes de différences innées ou génétiques dans la réponse à la contrainte thermique. Tous les humains semblent réagir comme des animaux tropicaux; leur aptitude à vivre et à travailler dans toute une gamme de conditions thermiques est le reflet d'une adaptation grâce à une combinaison complexe de comportements et de développements technologiques. Les différences ethniques apparentes dans la réponse à la contrainte provoquée par la chaleur sont dues plus probablement à la taille, aux antécédents personnels et à l'état de nutrition, qu'à des caractéristiques innées.

*Age.* Les populations industrialisées présentent généralement une baisse progressive de la tolérance à la chaleur à partir de 50 ans. Certains signes indiquent une diminution générale, liée à l'âge, de la vasodilatation cutanée (augmentation du calibre des vaisseaux sanguins de la peau) et du débit sudoral maximal, mais cela tient surtout à des changements dans le mode de vie, qui réduisent l'activité physique et accroissent l'accumulation de graisse. L'âge ne semble pas réduire la tolérance à la chaleur ni l'aptitude à l'acclimatement si un sujet conserve un niveau élevé de capacité aérobie. Cependant les populations vieillissantes sont plus sujettes aux maladies cardio-vasculaires ou à d'autres pathologies qui peuvent réduire leur tolérance à la chaleur.

*Forme physique.* La capacité aérobie maximale ( $VO_{2max}$ ) est probablement l'élément le plus déterminant de l'aptitude d'un sujet à exécuter un travail physique soutenu dans des conditions ambiantes chaudes. Comme on l'a vu précédemment, les différences de tolérance à la chaleur observées entre certains groupes que l'on avait attribuées au sexe, à la race ou à l'âge, sont aujourd'hui considérées comme des manifestations de la capacité aérobie et de l'acclimatement à la chaleur.

Pour acquérir et conserver une forte capacité de travail, il faudrait soumettre le système de transport de l'oxygène dans

l'organisme à des efforts réguliers sous la forme de sessions d'exercices vigoureux d'au moins 30 à 40 minutes chacune, 3 à 4 jours par semaine. Dans certains cas, l'activité au travail peut suffire à assurer cet entraînement physique, mais la plupart du temps les travaux professionnels sont moins exigeants et demandent à être complétés par un programme d'exercices réguliers permettant d'acquérir une forme optimale.

La perte de la capacité aérobie (perte de l'entraînement) est relativement lente, de sorte que les fins de semaine ou des vacances de 1 à 2 semaines n'entraînent que des changements minimes. Il est plus probable que les diminutions sérieuses de la capacité aérobie se produiront au fil de plusieurs semaines ou de plusieurs mois, à l'occasion d'une blessure, d'une maladie chronique ou de tout autre trouble obligeant un individu à changer de mode de vie.

*Acclimatement à la chaleur.* L'acclimatement au travail à la chaleur peut largement accroître la tolérance humaine à cette difficulté, si bien qu'un travail qui au départ dépassait la capacité d'une personne non acclimatée peut devenir plus facile après une période d'adaptation progressive. Les sujets ayant un très bon niveau de forme physique sont généralement déjà partiellement acclimatés à la chaleur et s'habitueront plus rapidement et avec moins de difficulté que des sédentaires. La saison peut aussi avoir un effet sur le temps nécessaire à l'acclimatement; les travailleurs recrutés en été peuvent déjà être en partie acclimatés, tandis que ceux qui le seront en hiver auront besoin d'une adaptation plus longue.

Dans la plupart des cas, l'acclimatement peut s'effectuer par une lente adaptation du travailleur au travail à la chaleur. Par exemple, un travailleur nouvellement embauché peut n'être affecté à ce travail que le matin ou pendant des durées croissantes durant les premiers jours. Cet acclimatement au travail devrait se faire sous l'étroite surveillance d'un personnel expérimenté; le nouveau venu devrait toujours être autorisé à se retirer dans un endroit plus frais chaque fois que des symptômes d'intolérance surviennent. Des conditions extrêmes peuvent exiger un protocole formel d'exposition progressive à la chaleur, tel que celui qui est utilisé pour les travailleurs des mines d'or en Afrique du Sud.

Un travailleur doit effectuer le travail à la chaleur trois à quatre fois par semaine s'il veut rester parfaitement acclimaté; une fréquence inférieure ou une exposition passive à la chaleur ont un effet beaucoup plus faible et peuvent entraîner une diminution progressive de la tolérance. Les congés de fin de semaine n'ont pas d'effet mesurable sur l'acclimatement. En revanche, une interruption de l'exposition à la chaleur pendant 2 à 3 semaines le fera perdre en majeure partie, encore que les sujets qui vivent dans des conditions climatiques chaudes ou font régulièrement de l'exercice aérobie le conserveront en partie.

*Obésité.* Une teneur élevée en graisses a peu d'effet direct sur la régulation thermique, puisque la dissipation de chaleur au niveau de la peau fait intervenir les capillaires et les glandes sudoripares qui sont plus proches de la surface de la peau que la couche adipeuse sous-cutanée. Cependant, les obèses sont handicapés par leur excédent de poids, car chaque mouvement exige un plus grand effort musculaire et produit donc plus de chaleur que chez une personne mince. De plus, l'obésité est souvent la manifestation d'un style de vie inactif, dont le résultat est une plus faible capacité aérobie et une absence d'acclimatement à la chaleur.

*Altérations de la santé.* La tolérance d'un travailleur à la chaleur peut être réduite par diverses affections telles que la fièvre (température supérieure à la normale), une immunisation récente ou une gastro-entérite avec déséquilibre hydrique et électrolytique. Les troubles cutanés, comme un coup de soleil ou une éruption, peuvent diminuer la capacité de sécréter de la sueur. De plus, la prédisposition à la maladie provoquée par la chaleur peut être accrue par certains médicaments, notamment les sympathicomimétiques, les anticholinergiques, les diurétiques, les phénothiaz-

nes, les antidépresseurs cycliques et les inhibiteurs de la monoamine-oxidase.

L'alcoolisme est un problème assez fréquent et qui peut être grave chez les personnes qui travaillent à la chaleur. L'alcool perturbe l'apport d'aliments et d'eau, mais agit aussi comme diurétique (accroissement de l'émission d'urine) et fausse le jugement. Les effets indésirables de l'alcool durent de nombreuses heures après son absorption. Les alcooliques victimes d'un coup de chaleur ont un taux de mortalité beaucoup plus élevé que les autres patients.

### Remplacer l'eau et les électrolytes par voie orale

**Hydratation.** L'évaporation de la sueur constitue la principale voie de dissipation de la chaleur de l'organisme et elle devient le seul mécanisme de rafraîchissement possible lorsque la température de l'air dépasse celle du corps. Le besoin d'eau ne peut pas être diminué par de l'entraînement, mais uniquement par un abaissement de la contrainte thermique subie par le travailleur. La perte hydrique et la réhydratation de l'être humain ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années et l'on dispose aujourd'hui de beaucoup plus d'informations sur ce point.

Un être humain pesant 70 kg peut sécréter indéfiniment 1,5 à 2 litres/h de sueur et un travailleur peut perdre plusieurs litres ou au maximum 10% de son poids au cours d'une journée s'il est exposé à des températures extrêmement chaudes. Cette déperdition risque d'être incapacitante si une partie de l'eau au moins n'est pas remplacée pendant les heures de travail. Cependant, puisque l'absorption intestinale de l'eau atteint au maximum 1,5 litre/h durant le travail, des débits sudoraux plus élevés provoquent une déshydratation cumulée au cours de la journée.

Boire pour éteindre la soif ne suffit pas pour qu'une personne reste parfaitement hydratée. Chez de nombreuses personnes, la soif n'apparaît que lorsqu'elles ont perdu 1 à 2 litres d'eau, et des travailleurs très motivés pour exécuter un travail de force peuvent subir des déperditions de 3 à 4 litres avant qu'une soif impérieuse ne les oblige à s'arrêter pour boire. Paradoxalement, la déshydratation réduit la capacité d'absorption intestinale de l'eau. Par conséquent, les travailleurs effectuant des travaux à la chaleur doivent savoir qu'il est important de boire suffisamment d'eau durant le travail et de poursuivre généreusement la réhydratation en dehors des heures de travail. Il devraient aussi connaître la valeur de la «préhydratation» — c'est-à-dire de la consommation d'une grande quantité d'eau juste avant une importante contrainte thermique —, car la chaleur et l'exercice empêchent l'organisme d'éliminer l'eau en excès dans l'urine.

L'employeur doit mettre de l'eau ou d'autres boissons à leur disposition afin de favoriser la réhydratation. Tout obstacle matériel ou administratif à la boisson ne peut que favoriser la déshydratation «volontaire» qui prédispose à une pathologie liée à la chaleur. Tout programme de maintien de l'hydratation doit prévoir au moins les éléments ci-après:

- De l'eau potable, de goût agréable, doit se trouver à proximité de chaque travailleur ou lui être apportée toutes les heures — plus fréquemment lorsque les conditions sont extrêmement pénibles.
- Des gobelets, respectant l'hygiène, doivent être prévus, car il est pratiquement impossible d'effectuer cette réhydratation à une fontaine.
- Les récipients contenant l'eau doivent être placés à l'ombre ou rafraîchis à la température de 15 à 20 °C (les boissons glacées ne sont pas recommandées, car elles ont tendance à inhiber l'ingestion).

Des aromatisants permettent de mieux accepter l'eau. Toutefois, les boissons qui ont beaucoup de succès parce qu'elles «courent» la soif sont à déconseiller, car elles inhibent l'ingestion avant

le rétablissement de l'hydratation. Pour cette raison, il est préférable de proposer de l'eau ou des boissons aromatisées diluées et d'éviter la présence de gaz carbonique, de caféine ainsi que les boissons à forte teneur en sucre ou en sel.

**Nutrition.** Bien que la sueur soit hypotonique (faible teneur en sel) par rapport au sérum, une transpiration importante entraîne une déperdition continue de chlorure de sodium et de faibles quantités de potassium, qui doivent être compensées chaque jour. De plus, le travail à la chaleur accélère le cycle des oligoéléments, notamment du magnésium et du zinc. Normalement, tous ces éléments essentiels doivent être apportés par l'alimentation; les travailleurs exposés à la chaleur doivent donc être incités à consommer des repas bien équilibrés et à éviter les barres sucrées ou les collations de substitution, dans lesquelles d'importants nutriments sont absents. Dans les pays industriels, certains régimes comprennent des taux élevés de chlorure de sodium et les travailleurs qui les consomment ne risquent guère de présenter des déficits en sel; mais il se peut que d'autres régimes plus traditionnels n'en contiennent pas suffisamment. Dans certains cas, l'employeur peut être amené à fournir des collations salées ou d'autres compléments alimentaires pendant les heures de travail.

Les «boissons pour le sport» ou les «désaltérants» contenant du chlorure de sodium, du potassium et des hydrates de carbone sont de plus en plus répandus dans les pays industriels. Toute boisson est composée d'une certaine quantité d'eau, mais les boissons contenant des électrolytes peuvent être utiles chez les sujets qui présentent une déshydratation déjà importante (perte hydrique) avec perte d'électrolytes (perte de sel). En général, ces boissons ont une forte teneur en sel et doivent être diluées avec de l'eau, à part égale ou supérieure, avant consommation. La recette suivante permet de préparer un mélange bien plus économique pour la réhydratation par voie orale: additionner 40 g de sucre (saccharose) et 6 g de sel (chlorure de sodium) à un litre d'eau potable. Il est préférable de ne pas donner de comprimés salés aux travailleurs, car ils en abusent facilement et des doses excessives peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux, un accroissement de l'émission d'urine et une plus grande sensibilité aux maladies liées à la chaleur.

### Modifier les pratiques de travail

La modification des pratiques de travail a pour but général de réduire la contrainte thermique moyenne du poste de travail et de la ramener à des limites acceptables. On peut à cet effet soit réduire le travail physique imposé à chaque travailleur, soit prévoir des pauses appropriées pour lui permettre de récupérer. En pratique, la moyenne de la production de chaleur métabolique d'un poste de travail ne devrait pas dépasser 350 W (5 kcal/min), car au-delà, la charge de travail entraîne un épuisement physique qui demande des pauses à la mesure de cet épuisement.

Il est possible de réduire les efforts individuels en diminuant certaines opérations telles que le levage et en limitant les déplacements et la tension musculaire statique qu'implique une posture malaisée. On y parvient par une optimisation du travail selon des principes ergonomiques, la mise à disposition de moyens mécaniques et une bonne répartition de l'effort physique entre les travailleurs.

Le moyen le plus simple de modifier ces pratiques de travail consiste à permettre à chacun de suivre son propre rythme. Les travailleurs de l'industrie exécutant une tâche qui leur est familière sous un climat doux auront des cadences correspondant à une température rectale voisine de 38 °C; l'exposition à des ambiances chaudes inconfortables les amènera naturellement à ralentir cette cadence ou à faire des pauses. Cette capacité d'ajuster volontairement leur rythme de travail dépend sans doute de l'effort cardio-vasculaire et de la fatigue qu'ils ressentent. Les êtres humains ne peuvent pas détecter consciemment une élévation de

la température centrale de leur corps; ils se fient plutôt à la température de la peau et à son humidité pour évaluer leur inconfort thermique.

Une autre façon de modifier les pratiques de travail consiste à adopter des cycles travail-repos précis où l'employeur fixe la durée des travaux et des pauses et le nombre de fois que ce cycle doit se répéter. La durée de la récupération thermique dépasse largement celle qui est requise pour abaisser le rythme respiratoire et la fréquence cardiaque provoqués par le travail. L'abaissement de la température centrale à des niveaux de repos nécessite 30 à 40 minutes dans un endroit frais et sec et davantage si le sujet doit se reposer dans des conditions ambiantes chaudes ou doit conserver ses vêtements de protection. Si le niveau de production doit rester constant, les travailleurs doivent être affectés en alternance à des travaux à la chaleur, suivis d'une période de récupération par du repos ou par l'exécution de tâches sédentaires dans un endroit frais.

### Contrôler les conditions climatiques

A supposer que la question de coût n'entre pas en ligne de compte, tous les problèmes de contrainte thermique pourraient être résolus par l'application de techniques capables de transformer les milieux professionnels contraignants en milieux plus hospitaliers. Il existe dans ce domaine tout un choix de techniques applicables en fonction des conditions spécifiques de travail et des ressources financières disponibles. En général, on distingue deux catégories de métiers exercés à la chaleur: ceux pour lesquels les processus de production s'effectuent par voie chaude et sèche, comme la fusion de métaux ou la production du verre, où les travailleurs sont exposés à un air très chaud et à une forte chaleur radiante, mais qui augmentent peu l'humidité de l'air, et ceux qui, à l'inverse, s'effectuent dans des conditions chaudes et humides, comme les usines textiles, la production de papier ou l'exploitation minière. La chaleur n'est pas aussi extrême, mais l'humidité est fortement augmentée par l'utilisation de processus de production humides avec dégagement de vapeur d'eau.

Les techniques de régulation des conditions ambiantes les plus économiques consistent habituellement à réduire le transfert de chaleur de la source vers le milieu ambiant. L'air chaud peut être évacué hors du lieu de travail et remplacé par de l'air frais. Les surfaces chaudes peuvent être recouvertes d'une isolation ou munies de revêtements réfléchissants afin de réduire la chaleur qu'ils dégagent, tout en conservant celle qui est nécessaire au procédé industriel. Un autre moyen de lutter contre la chaleur consiste à ventiler la zone de travail, afin de permettre à l'air extérieur de circuler largement. La solution la plus coûteuse est la climatisation, qui permet de rafraîchir et d'assécher l'atmosphère sur le lieu de travail. Même si le fait d'abaisser la température de l'air est sans effet sur la transmission de la chaleur radiante, il permet de réduire la température des murs et des autres surfaces qui peuvent constituer des sources secondaires de chaleur par convection ou par rayonnement.

Lorsqu'il s'avère infaisable ou trop coûteux de contrôler l'ensemble du milieu ambiant, il est possible d'améliorer localement les conditions thermiques du lieu de travail. Des zones climatisées peuvent être délimitées à l'intérieur du lieu de travail ou une circulation d'air frais peut être prévue à un poste de travail déterminé («refroidissement localisé» ou «douche d'air»). Un écran réfléchissant mobile ou même portable peut être interposé entre le travailleur et une source de chaleur radiante. La technologie moderne permet aussi de réaliser des systèmes de commande à distance des procédés à chaud, qui évitent aux travailleurs de s'exposer constamment à une chaleur particulièrement épuisante.

Lorsque le lieu de travail est ventilé par de l'air extérieur ou si la possibilité de climatisation est limitée, les conditions thermiques seront fonction des variations climatiques; une élévation subite de

la température et de l'humidité extérieures peut accroître la contrainte thermique à des niveaux dépassant la tolérance des travailleurs. Par exemple, une vague de chaleur au printemps peut déclencher une épidémie de troubles thermiques chez ceux qui ne sont pas habitués à cette chaleur comme ils le seraient en été. Il appartient donc à l'employeur de mettre en place un système de prévision des variations de contrainte thermique liées à la météorologie afin que les précautions nécessaires soient prises en temps voulu.

### Les vêtements de protection

Le travail dans des conditions de températures extrêmes peut nécessiter une protection thermique individuelle sous forme de vêtements spéciaux. Les vêtements isolants et réfléchissants assurent une protection passive; à elle seule, l'isolation peut protéger la peau contre les phénomènes thermiques transitoires. Les ouvriers travaillant face à une source de chaleur radiante limitée peuvent se protéger au moyen de tabliers réfléchissants. Les sapeurs-pompiers qui sont confrontés à des incendies de combustibles dégageant une chaleur extrêmement élevée sont équipés de combinaisons dites «antifeu» qui comportent une forte isolation contre l'air chaud et une surface aluminisée qui réfléchit la chaleur rayonnante.

Le gilet glacé, rempli de glace fondue ou de morceaux de glace (ou de glace sèche), porté sur un sous-vêtement pour empêcher le refroidissement gênant de la peau, est une autre forme de protection passive. Le changement de phase de la glace fondante absorbe une partie de la chaleur métabolique et de la chaleur ambiante de la surface recouverte, mais il faut remplacer régulièrement la glace; plus la contrainte thermique est élevée, plus la fréquence de remplacement de la glace le sera. Les gilets glacés se sont révélés très utiles dans les mines profondes, les salles des machines sur les navires, ainsi que dans d'autres milieux humides très chauds où l'on peut avoir facilement accès à des congélateurs.

La protection thermique active peut être assurée par des vêtements refroidis par air ou par liquide, qui recouvrent tout ou une partie du corps, généralement le torse et parfois la tête.

*Refroidissement par air.* Les systèmes les plus simples consistent à ventiler les vêtements grâce à l'air ambiant ou grâce à de l'air comprimé refroidi par dilatation ou par passage dans un dispositif à tube tourbillonnaire (vortex). Ce système nécessite de grands volumes d'air; rien que la ventilation d'une combinaison étanche exige au minimum 450 litres/min environ. Le refroidissement par air peut théoriquement s'effectuer par convection (variation de température) ou par évaporation de sueur (changement de phase). Cependant, l'efficacité de la convection est limitée par la faible chaleur spécifique de l'air et la difficulté de l'amener à de basses températures dans des milieux ambiants chauds. C'est pourquoi la plupart des vêtements refroidis par air fonctionnent au moyen d'un refroidissement par évaporation. Le travailleur ressent une contrainte thermique modérée et sa déshydratation est limitée, mais il peut assurer sa régulation thermique par le contrôle naturel de sa transpiration. Le refroidissement par air améliore le confort grâce à sa tendance à sécher le sous-vêtement. Inconvénients: 1) le sujet doit être relié à une source d'air; 2) les vêtements à répartition d'air sont encombrants; 3) il est difficile d'amener l'air jusqu'aux membres.

*Refroidissement par liquide.* Ces systèmes font circuler un mélange eau-antigel dans un réseau de voies ou de petits tubes, puis retournent le liquide réchauffé à un dissipateur thermique qui élimine la chaleur ajoutée durant le passage le long du corps. Le liquide circule généralement à une vitesse d'environ 1 litre/min. Le dissipateur thermique peut dégager l'énergie thermique dans le milieu ambiant par évaporation, fusion, réfrigération ou procédés thermoélectriques. Les vêtements refroidis par liquide assurent un potentiel de refroidissement bien plus important que les systèmes

à air. Une combinaison recouvrant tout le corps, reliée à un dissipateur thermique adapté peut éliminer toute la chaleur métabolique et maintenir le confort thermique sans nécessiter la sudation; les astronautes portent un système de ce type pour travailler hors de leur engin spatial. Toutefois, un mécanisme de refroidissement aussi puissant exige un système de régulation du confort, qui implique généralement le réglage manuel d'une soupape qui détourne une partie du liquide en circulation en aval du dissipateur thermique. Les systèmes à refroidissement par liquide peuvent être conçus sous forme d'équipement dorsal afin d'assurer un refroidissement continu durant le travail.

Il est évident qu'un dispositif de refroidissement quel qu'il soit ajoute du poids et de l'encombrement qui peuvent gêner le travailleur dans son travail. Par exemple, le poids d'un gilet glacé augmente énormément la dépense métabolique de la locomotion et c'est donc pour des travaux physiques légers, tels que de la surveillance dans les compartiments chauds, qu'il est le plus utile. Les systèmes qui relient le travailleur à un dissipateur thermique sont inutilisables pour de nombreux types de travaux. Un refroidissement intermittent peut être utile si les travailleurs doivent porter des vêtements de protection lourds (tels que des combinaisons de protection contre les produits chimiques) et ne peuvent pas transporter un dissipateur thermique ou lui être reliés pendant le travail. Retirer la combinaison à chaque pause prend du temps et peut exposer le travailleur à des produits toxiques; dans ces conditions, il est plus simple de faire porter aux travailleurs un vêtement refroidissant qui n'est relié à un dissipateur thermique que pendant le repos, ce qui leur permet une récupération thermique dans des conditions qui seraient autrement intolérables.

## ● LES BASES PHYSIQUES DU TRAVAIL À LA CHALEUR

Jacques B. Malchaire

### Les échanges thermiques

Le corps humain échange de la chaleur avec son environnement selon plusieurs voies: par conduction au travers des surfaces en contact, par convection et évaporation avec l'air ambiant, par rayonnement avec les surfaces avoisinantes.

#### La conduction

La conduction est la transmission de chaleur entre deux solides en contact. De tels échanges sont observés entre la peau et les vêtements, les chaussures, les points d'appui (siège, poignées), les outils, etc. En pratique, dans le calcul du bilan thermique, ce flux de chaleur par conduction est approximé par le flux de chaleur par convection et rayonnement qui auraient lieu si ces surfaces n'étaient pas en contact avec d'autres matériaux.

#### La convection

La convection est le transfert de chaleur entre la peau et l'air qui l'entoure. Si la température cutanée,  $T_{sk}$ , en degrés celsius (°C), est supérieure à la température de l'air ( $T_a$ ), l'air en contact avec la peau se réchauffe et, par conséquent, s'élève. Une circulation d'air, appelée convection naturelle, s'établit alors à la surface du corps. Cet échange devient plus important si l'air ambiant passe sur la peau à une certaine vitesse: la convection devient forcée.

Le flux de chaleur échangé par convection  $C$ , en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) peut être estimé par:

$$C = h_c F_{clC} (T_{sk} - T_a)$$

où  $h_c$  est le coefficient de convection ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), qui est fonction de la différence entre  $T_{sk}$  et  $T_a$  en cas de convection naturelle, et

de la vitesse de l'air ( $V_a$  m/s), en convection forcée;  $F_{clC}$  est le facteur par lequel le vêtement réduit les échanges convectifs.

### Le rayonnement

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont l'intensité est fonction de la quatrième puissance de sa température absolue  $T$  (en degrés Kelvin (K)). La peau, dont la température peut se situer entre 30 et 35 °C (303 et 308 K), émet un tel rayonnement qui se situe dans l'infrarouge. Elle reçoit par ailleurs le rayonnement émis par les surfaces avoisinantes. Le flux thermique échangé par rayonnement  $R$  (en  $W/m^2$ ) entre le corps et son environnement peut être décrit par l'expression suivante:

$$R = \epsilon \sigma \left( \frac{A_R}{A_D} \right) F_{clR} (T_{sk}^4 - T_r^4)$$

où:

$\sigma$  est la constante universelle de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ );

$\epsilon$  est l'émissivité de la peau qui, pour le rayonnement infrarouge, est égale à 0,97 et indépendante de la longueur d'onde et, pour le rayonnement solaire, vaut environ 0,5 pour la peau d'un sujet de race blanche et 0,85 pour la peau d'un sujet de race noire;

$A_R/A_D$  est la fraction de la surface du corps participant aux échanges qui est de l'ordre de 0,66, 0,70 ou 0,77 selon que le sujet est accroupi, assis ou debout:

$F_{clR}$  est le facteur par lequel le vêtement réduit les échanges par rayonnement:

$T_{sk}$  (en K) est la température cutanée moyenne;

$T_r$  (en K) est la température moyenne de rayonnement de l'environnement, c'est-à-dire la température uniforme d'une sphère noire mate, de grand diamètre, qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel.

Cette expression peut être remplacée par une équation simplifiée du même type que celle des échanges par convection:

$$R = h_r (A_R/A_D) F_{clR} (T_{sk} - T_r)$$

où  $h_r$  est le coefficient d'échange par rayonnement ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ).

### L'évaporation

Toute surface mouillée comporte une couche d'air saturée en vapeur d'eau. Si l'atmosphère n'est pas elle-même saturée, la vapeur diffuse de cette couche vers l'atmosphère. La couche a alors tendance à se régénérer en puisant la chaleur d'évaporation (0,674 watt heure par gramme d'eau) à la surface mouillée qui se refroidit. Si la peau est couverte entièrement de sueur, l'évaporation est maximale ( $E_{max}$ ) et ne dépend que des conditions ambiantes selon l'expression suivante:

$$E_{max} = h_e F_{pcl} (P_{sk,s} - P_a)$$

où:

$h_e$  est le coefficient d'échange par évaporation ( $W/m^2 \text{ kPa}$ );

$P_{sk,s}$  est la pression saturante de vapeur d'eau à la température de la peau (en kPa);

$P_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau de l'ambiance (en kPa);

$F_{pcl}$  est le facteur de réduction des échanges évaporatoires par le vêtement.

### L'isolement thermique vestimentaire

Un facteur de correction intervient dans le calcul des flux de chaleur par convection, rayonnement et évaporation de manière à tenir compte du vêtement. Dans le cas d'un vêtement en coton, les deux caractéristiques thermiques du vêtement,  $F_{clC}$  et  $F_{clR}$  peuvent être déterminées par:

$$F_{cl} = 1 / (1 + (h_c + h_r)I_{cl})$$

où:

- $h_c$  est le coefficient d'échange par convection;
- $h_r$  est le coefficient d'échange par rayonnement;
- $I_{cl}$  est l'isolation thermique effective ( $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ) du vêtement.

En ce qui concerne la réduction de transfert de chaleur par évaporation, le facteur correctif  $F_{pcl}$  est donné par l'expression suivante:

$$F_{pcl} = 1 / (1 + 2,22 h_c I_{cl})$$

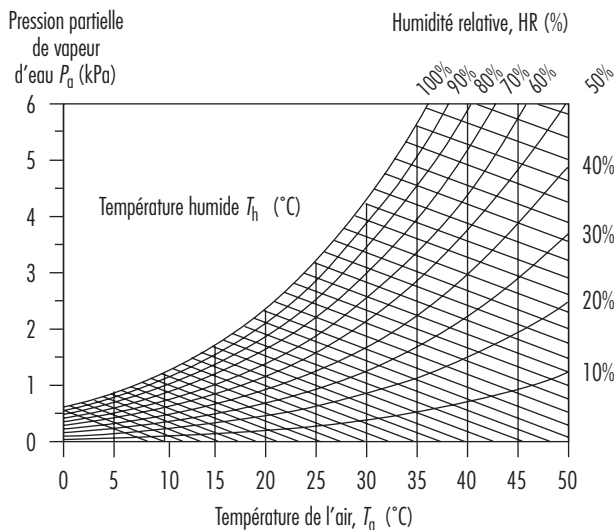
Les isolations thermiques vestimentaires  $I_{cl}$  s'expriment en  $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  par watt ou en clo. Une isolation de 1 clo correspond à  $0,155 m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$  et est fournie, par exemple, par une tenue de ville classique (chemise, cravate, pantalon, veston, etc.).

La norme ISO 9920 (ISO, 1995) donne l'isolation thermique de différents ensembles vestimentaires. Dans le cas de vêtements de protection spéciaux, qui réfléchissent la chaleur ou restreignent la perméabilité à la vapeur dans des conditions d'exposition à la chaleur, ou qui absorbent ou isolent dans des conditions froides, des facteurs de correction particuliers doivent être utilisés. A ce jour cependant, le problème est encore mal connu et les prévisions mathématiques restent fort approximatives.

**L'évaluation des paramètres de base de la situation de travail**

Comme on l'a vu ci-dessus, les échanges thermiques par convection, rayonnement et évaporation sont fonction de quatre paramètres climatiques — la température de l'air  $T_a$  en  $^\circ\text{C}$ , l'humidité de l'air exprimée par sa pression partielle de vapeur  $P_a$  en kPa, la température moyenne de rayonnement  $T_r$  en  $^\circ\text{C}$ , et la vitesse de l'air  $V_a$  en m/s. Les appareils et méthodes de mesurage de ces paramètres physiques de l'environnement font l'objet de la norme ISO 7726 (ISO, 1998) qui décrit les différents types de capteurs à utiliser, spécifie leur gamme de mesurage et leur précision et recommande certaines procédures de mesurage. La présente section résume une partie des données de cette norme et rappelle en particulier les conditions d'utilisation des appareils et capteurs les plus courants.

Figure 42.3 • Diagramme psychrométrique



**La température de l'air**

La température de l'air ( $T_a$ ) doit être mesurée en faisant abstraction de tout rayonnement thermique. La précision de la mesure doit être de  $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  dans la gamme de 10 à 30  $^\circ\text{C}$  et de  $\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  en dehors de cette gamme.

Il existe de nombreux types de thermomètres sur le marché. Les thermomètres à mercure sont les plus courants. Leur avantage est leur précision, s'ils sont correctement étalonnés à l'origine. Leurs désavantages majeurs sont leur temps de réponse très long et l'impossibilité d'enregistrer le phénomène. Par contre, les thermomètres électroniques ont généralement des temps de réponse très courts (5 secondes à 1 minute), mais peuvent poser des problèmes d'étalonnage.

Quel que soit le type de thermomètre, le capteur doit être protégé contre le rayonnement, ce qui est généralement assuré par un cylindre creux en aluminium brillant, entourant le capteur. Une telle protection est assurée par le psychromètre qui sera mentionné dans la section suivante.

**La pression partielle de vapeur d'eau**

L'humidité de l'air peut être caractérisée de quatre façons:

1. la *température de rosée*: température à laquelle l'air doit être refroidi pour devenir saturé en humidité ( $T_{dp}$ ,  $^\circ\text{C}$ );
2. la *pression partielle de vapeur d'eau*: fraction de la pression atmosphérique due à la vapeur d'eau ( $P_a$ , kPa);
3. l'*humidité relative (HR)* qui est donnée par l'expression:  

$$HR = 100 \cdot P_a / P_{s,ta}$$
 où  $P_{s,ta}$  est la pression de vapeur saturante associée à la température de l'air;
4. la *température humide* ( $T_h$ ) qui est la température la plus basse atteinte par un manchon humide protégé contre le rayonnement et ventilé à plus de 2 m/s par l'air ambiant.

Toutes ces grandeurs sont liées mathématiquement.

La pression de vapeur d'eau saturante à une température quelconque  $T$ , ( $P_{s,t}$ ), est donnée par:

$$P_{s,t} = 0,6105 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right)}$$

tandis que la pression partielle de vapeur d'eau est liée à la température humide par:

$$P_a = P_{s,th} - (T_a - T_h) / 15$$

où  $P_{s,th}$  est la pression de vapeur saturante à la température humide.

Le diagramme psychrométrique permet de relier toutes ces grandeurs (voir figure 42.3). Il comporte:

- en ordonnée, l'échelle de pression partielle de vapeur d'eau  $P_a$  exprimée en kPa;
- en abscisse, l'échelle de température de l'air;
- les courbes d'humidité relative constante;
- les droites obliques de température humide constante.

Les paramètres d'humidité les plus souvent utilisés en pratique sont:

- l'humidité relative mesurée au moyen d'hygromètres ou d'appareils électroniques plus spécialisés;
- la température humide mesurée au moyen du psychromètre; on en dérive la pression partielle de vapeur d'eau qui est le paramètre le plus utilisé dans le calcul du bilan thermique.

La gamme de mesurage et la précision recommandées sont respectivement de 0,5 à 6 kPa et de  $\pm 0,15$  kPa. Lorsqu'on mesure plutôt la température humide, la gamme s'étend de 0 à 36  $^\circ\text{C}$

avec une précision identique à celle de la température de l'air. En ce qui concerne les hygromètres pour le mesurage de l'humidité relative, la gamme doit s'étendre de 0 à 100% avec une précision de  $\pm 5\%$ .

### La température moyenne de rayonnement

La température moyenne de rayonnement ( $T_r$ ) a été définie précédemment; elle peut être déterminée de trois manières différentes:

1. à partir de la température mesurée par le thermomètre à globe noir;
2. à partir des températures planes de rayonnement mesurées dans trois directions perpendiculaires;
3. par calcul, en intégrant les effets des différentes sources de rayonnement.

Seule la première technique sera revue ici.

Le thermomètre à globe noir consiste en une sonde thermique dont l'élément sensible est placé au centre d'une sphère complètement fermée, réalisée dans un métal bon conducteur de chaleur (cuivre) et peinte en noir mat pour avoir un coefficient d'absorption dans l'infrarouge proche de 1,0. La sphère est placée au poste de travail et soumise aux échanges par convection et rayonnement. La température du globe ( $T_g$ ) dépend alors de la température moyenne de rayonnement, de la température de l'air et de la vitesse de l'air.

Pour un globe noir standard de 15 cm de diamètre, la température moyenne de rayonnement peut être calculée à partir de la température du globe sur la base de l'expression suivante:

$$T_r = \sqrt[4]{(T_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times V_a^{0,6} (T_g - T_a)} - 273$$

A l'usage, il faut souligner la nécessité de conserver l'émissivité du globe proche de 1,0 en le repeignant soigneusement en noir mat.

La limitation majeure de ce type de globe provient de son temps de réponse de l'ordre de 20 à 30 minutes selon le type de globe utilisé et les conditions ambiantes. Le mesurage n'est valable que si les conditions de rayonnement sont constantes durant cet intervalle de temps. Or, ce n'est pas toujours le cas en milieu industriel. Le mesurage est alors faux. Ces temps de réponse concernent les globes de 15 cm de diamètre, utilisant des thermomètres à mercure ordinaires. Ils sont plus courts si des capteurs de moindre capacité thermique sont utilisés ou si le diamètre du globe est réduit. L'expression ci-dessus doit alors être modifiée pour tenir compte de ce diamètre différent.

L'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) utilise directement la température du globe noir. Il est indispensable alors d'employer un globe de 15 cm de diamètre. Par contre, d'autres indices font appel à la température moyenne de rayonnement. Un globe plus petit peut alors être choisi pour réduire le temps de réponse à condition que l'expression ci-dessus soit modifiée pour en tenir compte. La norme ISO 7726 (ISO, 1998) tolère, pour le mesurage de  $T_r$ , une précision de  $\pm 2$  °C entre 10 et 40 °C et de 5 °C en dehors de cet intervalle.

### La vitesse de l'air

La vitesse de l'air doit être mesurée en faisant abstraction de la direction du courant d'air. A défaut, la mesure doit être réalisée dans trois axes perpendiculaires ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) et la vitesse globale calculée par sommation vectorielle:

$$V_a = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

La gamme de mesurage préconisée par la norme ISO 7726 s'étend de 0,05 à 2 m/s. La précision requise est de 5%. Elle doit

être mesurée en moyenne sur un intervalle de temps de 1 ou 3 minutes.

On peut distinguer deux catégories d'appareils de mesurage de la vitesse de l'air: les anémomètres à ailettes et les anémomètres thermiques.

### Les anémomètres à ailettes

La mesure est réalisée à partir du comptage du nombre de tours des ailettes durant un certain intervalle de temps. On obtient ainsi de manière discontinue la vitesse moyenne sur cet intervalle de temps. Ces anémomètres ont deux limitations majeures:

1. Ils sont très directionnels et doivent donc être orientés strictement dans la direction du courant d'air. Lorsque celle-ci est imprécise ou inconnue, il y a lieu de réaliser les mesurages dans trois directions orthogonales.
2. La gamme de mesurage s'étend environ de 0,3 m/s à 10 m/s. Cette limitation aux basses vitesses s'avère importante lorsqu'il s'agit, notamment, d'analyser une situation de confort thermique où il est généralement recommandé de ne pas dépasser des vitesses de 0,25 m/s. Si la gamme de mesurage peut s'étendre au-delà de 10 m/s, elle ne descend guère en dessous de 0,3, voire 0,5 m/s, ce qui limite grandement les possibilités d'utilisation dans les ambiances proches du confort où les vitesses maximales admises sont de 0,5, voire 0,25 m/s.

### Les anémomètres thermiques

Ces appareils sont en fait complémentaires des premiers en ce sens que leur gamme dynamique s'étend essentiellement de 0 à 1 m/s. Il s'agit d'appareils donnant une estimation de la vitesse instantanée en un point de l'espace: il est donc nécessaire de moyenniser les valeurs dans le temps et dans l'espace. Ces appareils sont souvent très directionnels également et la remarque ci-dessus est aussi applicable. Enfin, la mesure n'est correcte qu'à partir du moment où l'appareil a été mis en température dans l'ambiance à évaluer.

## L'ÉVALUATION DE LA CONTRAINTE THERMIQUE ET LES INDICES DE CONTRAINTE THERMIQUE

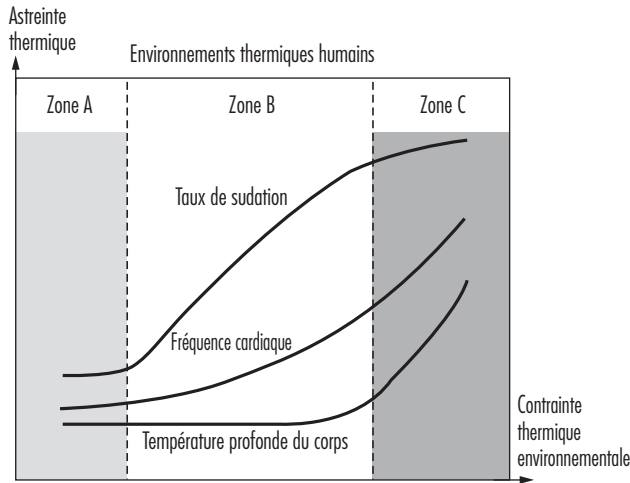
Kenneth C. Parsons

On parle de contrainte thermique lorsque l'environnement d'un sujet (température de l'air, chaleur rayonnante, humidité et vitesse de l'air), ses vêtements et son activité interagissent de telle manière que la température de son corps tend à s'élever. Le système de thermorégulation du corps y répond en accroissant la déperdition thermique. Cette réponse peut être puissante et efficace, mais elle peut aussi produire une astreinte responsable d'un inconfort, voire d'une maladie liée à la chaleur ou même entraîner la mort. Il est donc important d'évaluer les milieux chauds si l'on veut garantir la sécurité et la santé des travailleurs.

Les indices de contrainte thermique fournissent des outils permettant d'évaluer les milieux chauds et de prévoir l'astreinte thermique probable développée par le corps. Les valeurs limites basées sur les indices de contrainte thermique indiquent à quel moment cette astreinte peut devenir intolérable.

Les mécanismes de la contrainte thermique sont connus d'une manière générale et les pratiques de travail dans les milieux chauds sont bien établies. Il s'agit en fait de savoir reconnaître les signes d'alerte de la contrainte thermique, de prévoir des programmes d'acclimatement et de remplacer les pertes hydriques.

Figure 42.4 • Variation des trois indicateurs de l'astreinte thermique en fonction de l'élévation de la contrainte thermique



Dans la zone B, zone normative, la température profonde du corps est maintenue constante par l'élévation du taux de sudation. Dans la zone C, zone commandée par l'environnement, le taux de sudation ne s'élève plus, contrairement à la température du corps. La transition est appelée limite supérieure de la zone normative.

Source: OMS, 1969.

Mais on déplore encore de nombreux accidents et il y aurait lieu d'en tirer certains enseignements.

En 1964, Leithead et Lind ont présenté les résultats d'une vaste enquête dont ils ont conclu que les troubles provoqués par la chaleur sont dus à une ou plusieurs des trois raisons suivantes :

1. l'existence de facteurs tels que la déshydratation ou l'absence d'acclimatement;
2. l'absence d'une bonne appréciation des dangers de la chaleur chez les responsables de la surveillance ou chez les sujets exposés au risque;
3. des circonstances accidentelles ou imprévisibles entraînant une exposition à une contrainte thermique très élevée.

D'après eux, bon nombre des décès peuvent être attribués à la négligence et à un manque d'attention au problème; même dans le cas où des troubles se produisent, on peut y faire face efficacement si l'on a prévu les moyens d'un traitement correct et rapide.

### Les indices de contrainte thermique

Un indice de contrainte thermique est un chiffre qui à lui seul intègre les effets des six paramètres fondamentaux de tout environnement humain chaud, de telle sorte que sa valeur variera en fonction de l'astreinte thermique développée par le sujet exposé à des conditions ambiantes chaudes. Cet indice (mesuré ou calculé) permet de concevoir et d'appliquer, dans la pratique professionnelle, des limites de sécurité. La détermination du meilleur indice de contrainte thermique a fait l'objet de nombreuses recherches et le débat n'est pas clos. Par exemple, Goldman (1988) a proposé 32 indices de contrainte thermique et plus du double sont en usage dans le monde. Beaucoup d'entre eux ne tiennent pas compte des six paramètres fondamentaux, même si tous ces paramètres doivent être pris en considération au stade de l'application. L'utilisation de ces indices dépend de chaque contexte et c'est pourquoi ils sont aussi nombreux. Certains indices sont théoriquement inadéquats, mais peuvent être justifiés pour certaines applications spécifiques pour lesquelles l'expérience a montré qu'ils sont valables dans un secteur donné.

Kerslake (1972) constate que «Il est peut-être évident que la façon dont les facteurs environnementaux doivent être combinés dépend des caractéristiques fonctionnelles du sujet qui y est exposé, mais aucun des indices qui sont utilisés actuellement ne tient formellement compte de cette marge d'appréciation». Le mouvement de normalisation (par exemple, ISO 7933 (ISO, 1989b) et ISO 7243 (ISO, 1989a)) a poussé à adopter plus ou moins les mêmes indices dans le monde entier. Il sera nécessaire, cependant, d'acquérir de l'expérience quant à l'utilisation de tout nouvel indice.

Dans la plupart des indices de contrainte thermique, la sudation est considérée comme étant, directement ou indirectement, la principale astreinte sur le corps. Par exemple, plus la sudation doit être importante pour maintenir l'équilibre thermique et la température interne du corps, plus l'astreinte développée par le corps est élevée. Pour qu'un indice de contrainte thermique représente l'environnement thermique humain et permette de prévoir l'astreinte thermique, il faut un mécanisme grâce auquel on puisse estimer la capacité qu'a une personne qui transpire de perdre de la chaleur dans le milieu chaud.

Tableau 42.2 • Equations utilisées dans le calcul de l'indice de contrainte thermique (HSI) et des durées d'exposition admissibles (AET)

		Vêtus	Non vêtus
1) Déperdition par rayonnement (R)	$R = k_1(35 - T_r) \text{ Wm}^{-2}$	pour $k_1 =$	4,4      7,3
2) Déperdition par convection (C)	$C = k_2 \cdot v^{0,6}(35 - T_a) \text{ Wm}^{-2}$	pour $k_2 =$	4,6      7,6
3) Déperdition maximale par évaporation ( $E_{\text{max}}$ )	$E_{\text{max}} = k_3 \cdot v^{0,6}(56 - P_a) \text{ Wm}^{-2}$ (limite supérieure de $390 \text{ Wm}^{-2}$ )	pour $k_3 =$	7,0      11,7
4) Déperdition requise par évaporation ( $E_{\text{req}}$ )	$E_{\text{req}} = M - R - C$		
5) Indice de contrainte thermique (HSI)	$HSI = \frac{(E_{\text{req}})}{(E_{\text{max}})} \times 100$		
6) Durées d'exposition admissibles (AET)	$AET = \frac{2440}{(E_{\text{req}} - E_{\text{max}})} \text{ min}$		

où: M = puissance métabolique;  $T_a$  = température de l'air;  $T_r$  = température de rayonnement;  $P_a$  = pression partielle de vapeur; v = vitesse de l'air.

Tableau 42.3 • Interprétation des valeurs de l'indice de contrainte thermique (HSI)

HSI	Effet d'une exposition pendant 8 heures
-20	Astreinte froide légère (par exemple, récupération après exposition à la chaleur)
0	Pas d'astreinte thermique
10-30	Astreinte chaude légère à modérée. Peu d'effet sur le travail physique, mais effet possible sur le travail qualifié
40-60	Astreinte chaude sévère, avec menace pour la santé si faible forme physique. Acclimatement requis
70-90	Astreinte chaude très sévère. Le personnel doit être sélectionné par examen médical. Assurer un apport adapté d'eau et de sel
100	Astreinte chaude maximale tolérée chaque jour par des hommes jeunes, en forme, acclimatés
Plus de 100	Durée d'exposition limitée par l'élévation de la température profonde du corps

Un indice lié à l'évaporation de sueur dans l'environnement est utile lorsque les sujets conservent la température interne de leur corps essentiellement par sudation. On dit, dans ce cas, qu'ils se trouvent dans la *zone normative* (OMS, 1969). La température profonde du corps reste relativement constante, tandis que la fréquence cardiaque et le débit sudoral s'élèvent en fonction de la contrainte thermique. A la limite supérieure de cette zone normative, la régulation thermique ne suffit pas pour maintenir l'équilibre thermique et la température du corps s'élève. On parle alors de *zone commandée par l'environnement* (OMS, 1969). Dans cette zone, le stockage de chaleur dépend de l'élévation de la température interne du corps et peut être pris comme indice pour déterminer les temps d'exposition admissibles (par exemple, sur la base d'une limite de sécurité calculée pour une température «centrale» de 38 °C (voir figure 42.4).

Dans la pratique, les indices de contrainte thermique peuvent être classés en *rationnels*, *empiriques* ou *directs*. Les indices rationnels sont basés sur des calculs effectués au moyen de l'équation de l'équilibre thermique; les indices empiriques dépendent des équations établies d'après les réponses physiologiques des êtres humains (par exemple, sur la déperdition de sueur) et les indices directs correspondent à une mesure (généralement la température) effectuée par des instruments permettant de simuler la réponse du corps humain. Les indices de contrainte thermique les plus déterminants et les plus largement utilisés sont décrits ci-après.

**Les indices rationnels**

**Le HSI (Heat Stress Index)**

Cet indice de contrainte thermique est égal au rapport entre l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique ( $E_{req}$ ) et l'évaporation maximale permise par le milieu ambiant ( $E_{max}$ ), exprimé sous forme de pourcentage (Belding et Hatch, 1955). Les équations sont données au tableau 42.2.

Le HSI en tant qu'indice est donc lié à l'astreinte thermique essentiellement sous la forme de la sudation pour les valeurs comprises entre 0 et 100. Lorsque le HSI est égal à 100, l'évaporation requise est le maximum qui peut être atteint et elle constitue donc la limite supérieure de la zone normative. Si  $HSI > 100$ , la chaleur est stockée dans le corps et les temps d'exposition admissibles sont fondés sur une élévation de 1,8 °C de la température centrale (stockage de chaleur de 264 kJ). Si  $HSI < 0$ , il y a

une légère astreinte due au froid — par exemple, lorsque des travailleurs se rétablissent d'une astreinte thermique chaude (voir tableau 42.3).

Une limite supérieure de 390 W/m<sup>2</sup> est attribuée à  $E_{max}$  (débit sudoral de 1 litre/h, considéré comme le débit maximal de transpiration maintenu pendant 8 heures). Des hypothèses simples sont établies pour l'effet des vêtements (chemise à manches longues et pantalon) et la température de la peau est supposée constante à 35 °C.

**L'ITS (Index of Thermal Stress)**

Givoni (1963, 1978) a établi cet indice de charge thermique, qui est une version améliorée du HSI dans la mesure où il reconnaît que la sueur ne s'évapore pas en totalité (voir «I. L'indice de stress thermique» dans l'encadré intitulé «Les indices de contrainte thermique: formules et définitions»).

**Le débit sudoral requis ( $SW_{req}$ )**

Un autre développement théorique et pratique du HSI et du ITS a été le débit sudoral requis ( $SW_{req}$ ) (Vogt et coll., 1981). Cet indice calcule la sudation requise pour l'équilibre thermique d'après une équation améliorée de cet équilibre, mais, surtout, il

Figure 42.5 • Organigramme d'interprétation pour  $SW_p$  (débit sudoral requis)

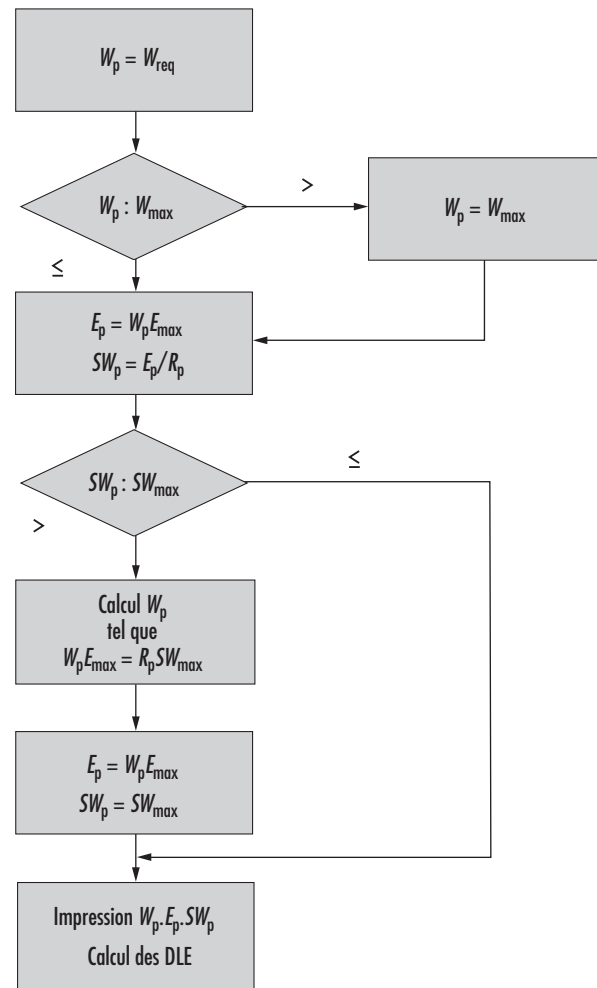


Tableau 42.4 • Valeurs de référence des critères de contraintes et d'astreintes thermiques chaudes selon la norme ISO 7933

Critères	Sujets non acclimatés		Sujets acclimatés	
	Alarme	Danger	Alarme	Danger
Mouillure cutanée maximale $W_{max}$	0,85	0,85	1,0	1,0
Débit sudoral maximal Repos ( $M < 65 \text{ Wm}^{-2}$ )	$SW_{max} \text{ Wm}^{-2} \text{ gh}^{-1}$ 100	150	200	300
Travail ( $M \geq 65 \text{ Wm}^{-2}$ )	$SW_{max} \text{ Wm}^{-2} \text{ gh}^{-1}$ 260	390	520	780
Stockage maximal de chaleur $Q_{max}$	50	60	50	60
Déperdition maximale d'eau $D_{max}$	1 000 2 600	1 250 3 250	1 500 3 900	2 000 5 200

Source: ISO, 1989b.

fournit un moyen pratique d'interprétation des calculs en comparant ce qui est requis à ce qui est physiologiquement possible et admissible chez l'être humain.

Ce nouvel indice a fait l'objet de débats approfondis, ainsi que d'évaluations en laboratoire et dans l'industrie (CCE, 1988) qui ont conduit à l'accepter comme norme internationale ISO 7933 (ISO, 1989b). Des différences entre les réponses données par les travailleurs et celles qui étaient prévues ont incité les autorités compétentes à l'assortir d'un certain nombre de réserves quant aux méthodes d'évaluation de la déshydratation et du transfert de chaleur par évaporation à travers les vêtements avant de l'adopter en tant que norme européenne (prEN-12515) (voir «II. Le débit sudoral requis», dans l'encadré intitulé «Les indices de contrainte thermique: formules et définitions»).

**L'interprétation de l'indice  $SW_{req}$**

Certaines valeurs de référence — à savoir ce qui est admissible ou ce que les sujets peuvent atteindre — sont fixées afin d'obtenir une interprétation pratique des valeurs calculées (voir tableau 42.4).

En premier lieu, on détermine les valeurs prédites de la mouillure ( $W_p$ ), du débit évaporatoire ( $E_p$ ) et du débit sudoral ( $SW_p$ ). En gros, si ce qui est calculé comme étant requis peut être obtenu, on considère ces valeurs comme les valeurs prédites (par exemple,  $SW_p = SW_{req}$ ). Si ces valeurs ne peuvent être réalisées, on peut prendre comme valeurs prédites les valeurs maximales (par exemple,  $SW_p = SW_{max}$ ). L'organigramme d'interprétation repris à la figure 42.5 donne de plus amples détails sur ce point.

Si le débit sudoral requis peut être réalisé par des sujets sans provoquer de perte hydrique inadmissible, aucune limitation n'est à apporter à l'exposition à la chaleur pendant un poste de 8 heures. Si tel n'est pas le cas, des durées limites d'exposition (DLE) seront calculées de la manière suivante:

Si  $E_p = E_{req}$  et  $SW_p = D_{max}/8$ ,  $DLE = 480 \text{ min}$ , et  $SW_{req}$  peut donc être pris comme indice de contrainte thermique. Si ces conditions ne sont pas satisfaites:

$$DLE 1 = 60Q_{max}/(E_{req} - E_p)$$

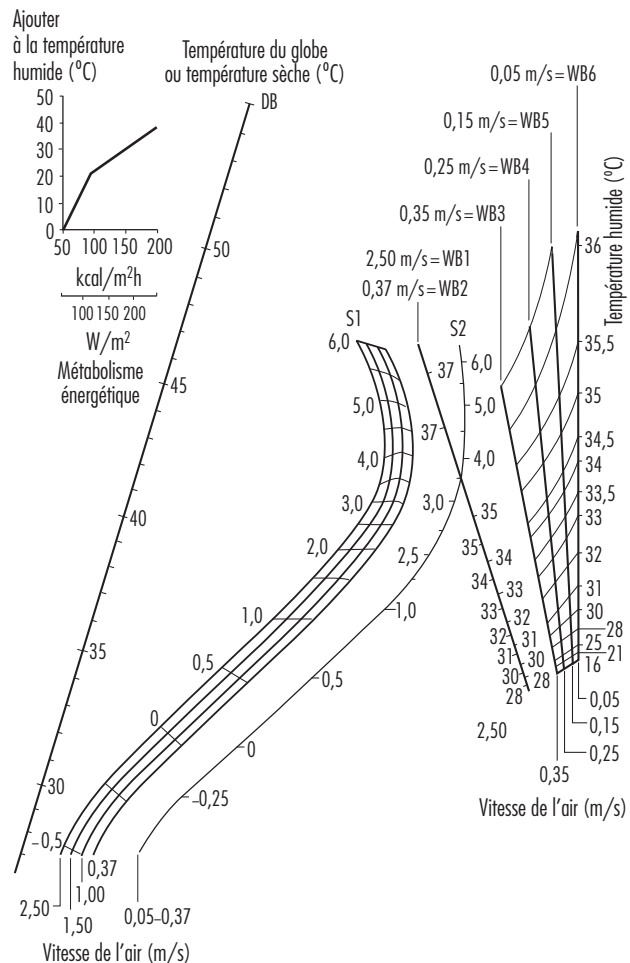
$$DLE 2 = 60D_{max}/SW_p$$

$DLE$  est la valeur la plus basse de  $DLE 1$  ou  $DLE 2$ . De plus amples informations sont données par ISO 7933 (ISO, 1989b).

**Les autres indices rationnels**

L'indice  $SW_{req}$  et la norme ISO 7933 (ISO, 1989b) (tableaux 42.8 et 42.9) fournissent la méthode rationnelle la plus perfectionnée, fondée sur l'équation de l'équilibre thermique et ont constitué chacun un énorme progrès. Cette approche permet divers autres développements. Toutefois, on peut aussi opter pour une autre approche consistant à adopter un modèle thermique. Pour l'essentiel, la nouvelle température effective (New Effective Temperature (ET\*)) et la température effective standard (Standard Effective Temperature (SET)) fournissent des indices basés sur le modèle de régulation thermique humaine à deux couches (Nishi et Gagge, 1977). Givoni et Goldman (1972, 1973) donnent aussi des modèles de prédiction empiriques pour l'évaluation de la contrainte thermique.

Figure 42.6 • Nomogramme de prévision du débit sudoral prévu sur 4 heures (Predicted Four Hours Sweat Rate (P4SR))



Le nomogramme est décrit dans l'encadré intitulé «Les indices de contrainte thermique: formules et définitions», sous le titre III («Le débit sudoral prévu sur 4 heures (P4SR)»).