Transferts de chaleur et coup de chaleur d'exercice. Applications à l'hyperthermie d'exercice et au refroidissement

F. Sauvet[a/b], S. Banzet[a], N. Koulmann[a/b], L. Bourdon[a/b].

a Unité vigilance, département environnements opérationnels, Institut de recherche biomédicale des armées, BP 73 – 91223 Brétigny sur Orge Cedex.
b École du Val-de-Grâce, 1 place Alphonse Laveran – 75230 Paris Cedex 5.

Résumé

L'hyperthermie d'exercice est par définition l'un des éléments constitutifs du coup de chaleur d'exercice. Elle résulte de la conjonction de facteurs intrinsèques, tels que le niveau d'adaptation à la chaleur et l'état de fatigue, et extrinsèques : l'intensité et la durée de l'effort, les conditions météorologiques et les facteurs vestimentaires. Les facteurs extrinsèques sont discutés sous l'angle des modifications aux transferts de chaleur qu'ils imposent entre le corps et son environnement. La compréhension des mécanismes de ces transferts de chaleur permet aussi d'optimiser les moyens de refroidissement à mettre en œuvre sur le terrain, dans les moyens d'évacuation et à l'hôpital, lors de la prise en charge du coup de chaleur d'exercice.

Mot-clé : Bilan thermique.

Abstract

HEAT TRANSFERS AND EXERTIONAL HEATSTROKE. APPLICATION TO EXERCISE HYPERTHERMIA AND COOLING.

Exercise hyperthermia is one of the constitutive elements of exertional heatstroke. It results from the additive effects of intrinsic factors such as heat adaptation or fatigue, and extrinsic ones: the duration and the intensity of exercises meteorological conditions and clothes. How extrinsic factors do modify heat transfers between body and environment are discussed. A good understanding of the mechanisms of heat transfer is also useful to optimize the efficiency of cooling methods which have to be operated in the field, in ground transportation vehicles and in the hospital for EHS patients' emergency care.

Keyword: Thermal balance.

Introduction

En 2011, le Comité international olympique (CIO) a organisé une réunion d'experts sur le thème des risques médicaux liés aux environnements extrêmes. L'un des points évoqués a porté sur le faible taux d'accidents liés à la chaleur au cours des olympiades, y compris lors d'activités physiques réalisées dans des conditions réellement extrêmes de charge thermique externe comme le beach-volley, par exemple. Cela est contraire à ce que l'on observe en milieu militaire ou à un niveau de performance moins élevé. Par ailleurs, Brotherhood écrivait en 2008 «… la contrainte thermique chaude résulte d'un mélange complexe de comportement, de physique et de physiologie… L'analyse systématique des échanges thermiques permet de prédire les besoins en production sudorale et de déterminer si un équilibre thermique peut être atteint… De telles analyses apportent les bases objectives à l'évaluation de la sévérité d'un stress thermique, mais la thermorégulation comportementale et les variations individuelles de tolérance thermique rendent les calculs de risque très incertains. Des recherches empiriques fines sont nécessaires pour développer les algorithmes d'analyse du stress thermique dans les activités sportives » (1). Ces deux points montrent bien que malgré l'extraordinaire avancée des connaissances réalisée au cours des 30 dernières années dans le domaine de la biologie des

F. SAUVET, médecin principal, praticien confirmé de recherche. S. BANZET, médecin en chef, praticien certifié de recherche. N. KOULMANN, médecin en chef, praticien professeur agrégé de recherche. L. BOURDON, médecin chef des services, praticien professeur agrégé de recherche.
Correspondance : F. SAUVET, Unité vigilance, département environnements opérationnels, IRBA, BP 73 – 91223 Brétigny sur Orge.
E-mail : fabien.sauvet@sante.defense.gouv.fr

activités physiques et sportives, comme dans les autres champs scientifiques, il est toujours extrêmement difficile de comprendre le coup de chaleur d'exercice à l'échelon individuel. Pour autant, les grands principes physiques et physiologiques évoqués par Brotherhood délimitent un cadre qui permet d'appréhender le risque sous l'angle statistique, mais aussi d'éviter certaines erreurs de raisonnement. L'objectif de cet article est de rappeler quelques éléments sur les transferts de chaleur en biologie afin de mieux comprendre les facteurs qui concourent à l'hyperthermie d'exercice comme au refroidissement des patients hyperthermiques, dans une perspective de prévention.

Cet article n'a cependant pas l'ambition de proposer de nouvelles règles de prévention simples et efficaces, dont la mise au point nécessite encore de nombreux travaux d'équipes intégrées de chercheurs, cliniciens et épidémiologistes. Il complète, à destination des personnels soignants, le document réalisé récemment par le Centre national des sports de la Défense (2) et l'article sur les activités physiques et hyperthermie de ce dossier (3).

Les transferts de chaleur en biologie, leur impact sur les températures corporelles

Chaleur, température et transferts de chaleur

La chaleur est l'une des formes que peut prendre l'énergie. La température (T) d'un corps est directement fonction de son contenu calorique (Q), d'une part, et d'une propriété physique spécifique à ce corps, la « chaleur massique » (C), d'autre part, reliés par la relation : Q = M.C.T, où M est la masse du corps. Physiquement, la température est l'expression statistique de l'agitation moléculaire et particulaire à l'échelle atomique des composants du corps considéré. La biologie est concernée par quatre modalités de transfert de la chaleur, totalement différentes au plan physique : la première correspond aux transferts de masse, la convection sanguine cutanée par exemple, les trois autres correspondent à des transferts d'énergie sans transfert de masse, par contact direct entre deux particules de température différente, par changement d'état ou par émission/absorption de rayonnement infrarouge.

Les échanges de chaleur par contact direct entre particules (conduction) se font toujours dans le sens du gradient de température, de la particule la plus chaude vers la particule la plus froide. Les transferts de chaleur par changement d'état ne correspondent en biologie qu'aux transferts de chaleur liés à l'évaporation de l'eau ; dans cette modalité, chaque molécule d'eau qui s'évapore emporte avec elle une quantité d'énergie telle que 1 g d'eau absorbe 2,45 KJ (cette énergie est restituée lors du processus de condensation). Enfin, tout corps chaud rayonne dans l'infrarouge (IR) une quantité d'énergie liée à sa température de surface, d'une part, et d'une capacité spécifique à le faire (l'émissivité) d'autre part. La peau humaine se comporte comme un quasi-corps noir, c'est-à-dire que son émissivité ; et sa capacité d'absorption sont maximales : elle transforme les IR qu'elle reçoit en chaleur avec la même efficacité.

Dans l'organisme, la chaleur est produite par le métabolisme cellulaire, au niveau de tous les tissus actifs, puis transportée par la circulation sanguine. En situation physiologique, le débit sanguin local d'un organe est lié à l'intensité de son métabolisme, donc de sa production de chaleur. La circulation sanguine, qui évacue la chaleur produite par les organes les plus actifs dans le reste de l'organisme, a donc pour effet d'homogénéiser la température de l'ensemble de la partie interne de l'organisme, le « noyau thermique », quel que soit le niveau d'activité physique. La température du noyau thermique ou température corporelle profonde (Tc) est relativement stable d'un lieu à l'autre dans la zone centrale, et au repos, d'un moment à l'autre ; elle est comprise entre 36 °C, au milieu de la nuit, et 37,6 °C au cours de la période postprandiale du déjeuner.

L'interface thermique entre le corps et son environnement constitue l'enveloppe thermique. À tout instant, la température de l'enveloppe varie d'un point à l'autre, selon la distance à la surface du corps et selon le lieu, la température des extrémités étant toujours plus fraîche que celle du front ou du thorax. L'enveloppe a également une taille variable : au chaud, l'enveloppe se limite à la peau et aux extrémités, tandis qu'au froid, elle englobe les tissus sous-cutanés et jusqu'à la plus grande partie des membres. En pratique, la température moyenne de l'enveloppe ne peut pas être déterminée, on ne peut accéder qu'à sa température de sa surface : la température cutanée, qu'il faut mesurer en plusieurs points pour en apprécier la valeur moyenne ($T_m$cut).

L'enveloppe est d'une part réchauffée par le sang qui l'irrigue et d'autre part refroidit par l'environnement. Quand la température ambiante est basse, la peau est refroidie par conduction/convection thermique et perd de la chaleur par rayonnement. Quand la température ambiante est élevée, les échanges de chaleur entre la peau et l'environnement sont faibles, la peau ne peut être refroidie que par évaporation de l'eau de la sueur à sa surface.

Sauf quand il fait vraiment très froid, réaliser un exercice physique intense et prolongé provoque toujours une hyperthermie dite d'exercice que l'on peut appréhender sous l'angle des échanges de chaleur au travers de l'enveloppe thermique pour mieux en comprendre les déterminants thermocinétiques, et sous l'angle du bilan thermique général de l'organisme pour en comprendre le caractère obligatoire.

Les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement

Quelle que soit la situation thermique et métabolique, la chaleur produite par l'organisme ne peut être transférée à l'environnement que s'il existe un gradient de température entre la zone centrale, le noyau thermique, et la peau ; dans ce cas, la quantité de chaleur transférée à l'environnement sera proportionnelle au gradient de température noyau-peau et au débit sanguin cutané.

Le gradient de température entre la zone centrale et la peau ne peut être maintenu que si les transferts de chaleur

entre la peau et l'environnement se font à un niveau suffisant pour que la peau ne s'échauffe pas. Les principaux freins aux transferts de chaleur entre la peau et l'environnement sont de trois types : i) l'organisme n'arrive pas à produire suffisamment de sueur pour refroidir la peau, ii) l'environnement ne permet pas l'évaporation de la sueur produite, iii) les vêtements imposent une barrière thermique entre la peau et l'environnement trop importante.

L'insuffisance de production sudorale est parfois observée du fait de pathologies de la glande sudorale, elle est beaucoup plus fréquemment liée à un défaut d'adaptation à la chaleur, d'une part, et à la déshydratation, d'autre part (4). L'environnement peut ne pas permettre l'évaporation sudorale quand l'air est froid ou humide. Dans les deux cas, il est rapidement saturé en vapeur d'eau ce qui bloque les transferts de chaleur par changement d'état. Cette situation est fréquemment observée au niveau de l'air emprisonné entre des vêtements peu perméables et la peau (ambiance sous-vestiale), c'est l'effet « Kway ». Les vêtements ont également des propriétés isolantes, ralentissant les échanges thermiques directs entre la peau et l'air qui l'entoure.

Le bilan thermique de l'organisme

La somme arithmétique des gains et des pertes de chaleur de l'organisme permet d'en faire le bilan thermique. Quand le bilan thermique est équilibré, le contenu calorique du corps est stable et ses températures aussi ; par contre quand le bilan thermique est déséquilibré pendant des durées relativement prolongées, le contenu calorique du corps augmente ou diminue, selon que le bilan est positif ou négatif, et les températures corporelles augmentent (hyperthermie) ou diminuent (hypothermie).

Les gains de chaleur correspondent à la somme de la production métabolique de chaleur et aux transferts positifs depuis l'environnement. La production métabolique de chaleur est la somme d'une valeur fixe, liée au maintien des fonctions basales de l'organisme, de l'ordre de 1 Watt par kg de poids corporel, correspondant à la consommation d'environ 3 mL d'oxygène (soit 200 à 250 mL d'O_2 pour l'organisme entier), et d'une valeur variable liée à l'intensité du métabolisme d'action, donc essentiellement de l'intensité de l'exercice physique réalisé. Au cours d'un exercice intense et prolongé qui impose une consommation d'oxygène 15 à 20 fois supérieure à la valeur de repos, la production métabolique de chaleur augmente dans des proportions quasi-équivalentes.

Les transferts de chaleur entre le corps et son environnement peuvent être positifs (gains de chaleur) ou négatifs (pertes de chaleur) et correspondent à la somme des échanges par conduction, convection, évaporation et rayonnement IR (3) analogues à ceux d'un corps inerte de même composition, dits transferts insensibles (TI, conduction et convection cutanée plus convection et évaporation respiratoires plus perspiration cutanée), plus les pertes de chaleur liées à l'évaporation de la sueur, ou transferts « sensibles » puisque liés à la fonction thermophysiologique de l'organisme humain.

Quand la température environnementale est tempérée ou basse, les pertes de chaleur insensibles compensent la production métabolique de chaleur. Quand la température ambiante est élevée, les transferts de chaleur avec l'ambiance sont le plus souvent faibles (négatifs ou positifs), sauf quand le sujet est directement exposé à un ensoleillement important.

Le bilan thermique de l'organisme peut s'écrire de façon simplifiée :

$$M + \Sigma TI - Es = \Delta S \text{ avec } \Sigma TI : \pm K \pm C \pm R - Ei$$

où M est la production métabolique de chaleur, ΣTI est la somme des transferts de chaleur insensibles par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation insensible (perspiration et évaporation pulmonaire, Ei), Es est l'évaporation sudorale (sensible) et DS est la variation du contenu calorique de l'organisme pendant la période de temps considérée.

Le bilan thermique au cours de l'exercice physique intense et prolongé

Au cours des exercices physiques intenses et prolongés, la production métabolique de chaleur par le noyau thermique est très importante ; la vitesse à laquelle cette chaleur peut être évacuée dans l'environnement conditionne la vitesse à laquelle la température de la zone centrale augmente (hyperthermie) et le niveau auquel elle se stabilise.

La vitesse à laquelle la chaleur peut être évacuée dans l'environnement est sous la dépendance de plusieurs facteurs (3, 4) :

– la capacité du sujet à produire de la sueur, surtout liée à son niveau d'hydratation ;

– la vitesse à laquelle la sueur peut s'évaporer qui dépend du niveau de saturation en vapeur d'eau de l'air au contact de la peau et de son taux de renouvellement, c'est-à-dire la vitesse du vent ;

– la nature de la barrière interposée entre la peau et l'environnement, c'est-à-dire les vêtements.

Quand les conditions thermiques sont favorables, les pertes de chaleur par la sudation compensent la production métabolique de chaleur : le contenu calorique total de l'organisme ne change pas et les variations de température corporelle sont nulles. En pratique, cela n'est jamais observé au début d'un exercice physique intense. Il y a donc toujours un stockage de chaleur au début d'un exercice physique.

Les mécanismes thermophysiologiques de compensation mettent un certain temps pour se mettre en place. Pendant toute cette durée, le bilan thermique est déséquilibré dans le sens d'un gain de chaleur pour l'organisme, et les températures corporelles, profondes et cutanées, augmentent.

Quand les conditions de réalisation de l'exercice physique (nature des vêtements portés, ambiance climatique, état d'hydratation du sujet) le permettent, l'évacuation de chaleur par évaporation sudorale compense la production métabolique de chaleur, la température corporelle profonde de l'organisme se stabilise au niveau atteint à ce moment, toujours à un niveau plus élevé que la normale.

Pour fixer les idées, rappelons qu'un exercice intense et prolongé peut imposer une consommation d'oxygène de 3 $L.min^{-1}$, correspondant à une production thermique d'un peu moins de 1 kW. Dans de telles conditions et en l'absence d'échanges de chaleur avec l'environnement, Tc s'élèverait d'environ 1 °C toutes les 7 minutes, pour un sujet de 75 kg.

Dans certaines conditions, l'équilibre thermique n'est jamais atteint, soit parce que les conditions climatiques sont défavorables (temps chaud et humide par exemple) soit parce que les vêtements portés sont trop isolants (tenue de combat, tenue de protection), ce qui est toujours relatif à l'intensité de l'exercice physique. Dans ces conditions, la température de la peau, qui n'est pas assez refroidie par l'évaporation sudorale, peut atteindre des niveaux très élevés, supérieurs à 37 °C ; on parle alors d'hyperthermie « incompensable » qui conduit obligatoirement à un accident si l'exercice physique n'est pas interrompu à temps.

Applications à la prévention des risques au cours des activités physiques militaires

Trois des principaux facteurs conditionnant le niveau de l'hyperthermie lors d'un exercice intense et prolongé sont extrinsèques à l'individu : l'intensité de l'exercice qui conditionne la production métabolique de chaleur, la charge thermique imposée par l'ambiance (température, humidité relative, ensoleillement) et l'isolement thermique imposé par les vêtements. Les facteurs intrinsèques, tels que l'état d'adaptation à la chaleur, ont également un impact important sur la réponse thermique d'un sujet à l'exercice, ils ne sont pas discutés ici.

La production métabolique de chaleur

En milieu militaire, les trois facteurs extrinsèques méritent une attention particulière. En effet, la majorité des CCE surviennent lors des exercices dits de marche-course, effectués en tenue de combat, avec ou sans port de charge. Ces exercices sont souvent réalisés en groupe avec un objectif de temps maximal, à un moment fixé par un agenda souvent peu souple et donc pas toujours bien adapté aux conditions climatiques du moment.

Le problème de l'intensité de l'exercice est moins simple que la relation individuelle intensité de l'exercice-production métabolique de chaleur, évoquée plus haut, peut le laisser croire puisqu'il a été montré que le niveau d'hyperthermie atteint au cours d'un exercice contrôlé, dépend plus de l'intensité relative de l'exercice par rapport à l'effort maximal que peut produire le sujet (1), que du niveau d'intensité absolue exprimé par la performance réalisée. En clair, deux sujets effectuant le même exercice (la même course, dans le même temps, et donc théoriquement avec des dépenses énergétiques très proches) auront un niveau d'hyperthermie différent si l'un à une capacité, i.e. une consommation maximale d'oxygène (VO_2max), plus élevée que l'autre. Cela montre bien que l'impact thermo-physiologique d'une situation réelle ne s'appréhende pas de la même façon que le bilan thermodynamique d'une machinerie physique. Il est vraisemblable que les niveaux d'entraînement et d'adaptation à la chaleur ont un impact sur la relation intensité de l'exercice-hyperthermie, mais celui-ci n'est pas encore clairement déterminé. Cette notion a néanmoins un intérêt pratique, puisqu'elle montre que plus un sujet fourni un effort intense, relativement à ses capacités, plus il est à risque d'atteindre un niveau élevé d'hyperthermie d'exercice. En pratique, cela conforte l'intuition que dans un groupe réalisant un exercice physique imposé, les sujets les moins performants seront les plus à risque de développer une hyperthermie élevée.

Pour ce qui concerne les échanges thermique entre un sujet qui coure et son environnement, l'absence de modèles mathématiques précis les rend difficiles à évaluer ; ils sont également presque impossibles à mesurer en conditions écologiques. Au contraire des valeurs de Tc finales à l'arrêt de l'exercice qui sont connues, il n'existe actuellement que peu d'informations disponibles sur les profils de température corporelle profonde de sujet engagés dans des exercices intenses et prolongés tels que des courses de plus d'une heure, . Quand elles existent, elles montrent bien l'extrême dispersion des profils de montée en température en fonction des sujets (5).

Les facteurs climatiques et d'environnement

Si les réponses thermiques individuelles à un exercice intense et prolongé du type d'une marche-course sont très variables, elles répondent néanmoins à des principes dont l'un des plus importants est la charge thermique externe, *i.e.* imposée par l'environnement.

La dépendance des niveaux de performance des courses de haut niveau à la charge thermique imposée par l'ambiance en est une démonstration indirecte. En effet, la température optimale pour que les records au marathon soient battus est comprise entre 9 et 12 °C (6) ce qui est un niveau de température où l'hygrométrie joue un rôle modéré ; au-dessus de ces valeurs l'hyperthermie d'exercice et les redistributions vasculaires qu'elle induit (4, 7) diminuent la performance des sujets, au-dessous, les effets du froid sur le tractus respiratoire et sur les extrémités ont également un impact négatif. Ces courses sont de bons « laboratoires » puisque les quelques candidats à la victoire sont assez similaires en VO_2max et en niveau d'entraînement et qu'ils effectuent tous les courses au maximum de leur capacité.

L'impact de la charge thermique externe sur le risque de coup de chaleur est connu depuis fort longtemps, en particulier l'effet péjoratif de l'hygrométrie de l'air qui s'oppose à l'évaporation sudorale et l'effet bénéfique des mouvements d'air qui la facilitent (4). Si les mécanismes physiques qui sous-tendent ces effets sont bien connus, il est néanmoins extrêmement difficile d'évaluer la charge thermique réelle imposée par un environnement climatique à partir d'un index unique calculé sur les données météorologiques standards (température sèche de l'air, hygrométrie, vitesse du vent, ensoleillement…). En fait, plusieurs index ont été proposés dont aucun ne fait consensus.

L'un des moyens les plus employés, reste l'index WBGT qui se fonde essentiellement sur la mesure de

la « température humide » (Twb) qui intègre directement (et analogiquement) l'impact de l'hygrométrie et des déplacements d'air sur le refroidissement d'un thermomètre dont la surface est maintenue humide. Cette mesure se fait avec un dispositif spécial, relativement simple, qui donne également la température sèche (Tdb, la température météorologique) et la charge thermique radiante (Tr) liée à l'ensoleillement. L'index WBGT est obtenu par pondération simple de ces trois valeurs, la température humide étant de loin la valeur la plus importante. L'index WBGT a été mis au point il y a plus 50 ans maintenant par des ingénieurs américains pour la surveillance des conditions d'entraînement des recrues militaires américaines (8). Il a été intégré dans les principales normes d'évaluation de la charge thermique externe utilisées dans le monde industriel mais s'avère en fait assez complexe à utiliser dans le cadre d'activités sportives (1) essentiellement du fait du caractère multifactoriel du risque qui s'accommode mal du principe d'emploi des seuils. Des outils informatiques performants ont été mis au point au cours des dernières années, tels que le logiciel PREDICTOL (9) qui prend bien en compte les principaux facteurs impliqués, mais qui sont encore trop peu utilisées.

Les facteurs habillement et équipement

L'impact péjoratif des facteurs environnement et habillement sur les individus effectuant des exercices intenses est également clairement démontré au laboratoire comme en situation naturelle. Ainsi, entre 1997 et 2006, l'incidence des CCE a plus que doublé aux États-Unis (10), essentiellement du fait des accidents survenant au cours des entraînements de football américain qui se joue avec une combinaison de protection, les CCE dans ce sport étant 10 fois plus nombreux que dans les autres activités sportives universitaires (11). Armstrong, et al. (12) ont étudié l'impact thermique du port d'une tenue de protection complète de football américain (veste + protections des épaules + casque) *vs*. une tenue sans protections *vs*. une tenue de sport standard lors d'un effort mixte de marche-course et de déplacement de charge d'une durée de une heure en environnement contrôlé ; ils ont montré que la tenue complète imposait une charge thermique incompensable, les sujets atteignant 39 °C de Tc en 35 minutes en moyenne.

L'inadaptation thermique des vêtements aux activités physiques explique probablement une proportion notable des CCE survenant en environnement froid. La tenue de combat complète n'est pas une tenue adaptée à la réalisation d'efforts intenses et prolongés, prenant en compte le risque de coup de chaleur. Puisqu'elle est imposée lors de certains exercices, elle doit être « allégée » le plus possible (veste largement ouverte, manches retroussées) dès que les personnels ressentent la chaleur. Dans ces conditions d'exercice, des sous-vêtements type maillot ou tee-shirt sont fréquemment utilisés pour le confort qu'ils apportent, en particulier quand l'épreuve réalisée se fait avec charge (sac-à-dos). Ils sont à éviter de principe puisqu'ils augmentent la charge thermique. La marche commando en tenue complète avec charge est donc bien un exercice potentiellement à risque. Les cadres de contact doivent être vigilants à ce que les personnels qui les exécutent se placent dans les conditions les moins défavorables possibles, en particulier du point de vue vestimentaire.

Applications au refroidissement des sujets

La compréhension de la physique des transferts de chaleur peut également apporter des informations utiles aux techniques de refroidissement mises en œuvre sur le terrain comme à l'hôpital.

Le refroidissement sur le terrain

En effet, toutes les études actuelles confirment l'importance du refroidissement précoce comme principale thérapeutique de CCE, à mettre en œuvre aussi efficacement et aussi précocement que possible. Or, extraire une grande quantité de chaleur d'un corps n'est pas si simple quand on ne dispose pas de moyens spécifiques. En effet, pour faire passer un sujet de 75 kg de 40 à 38 °C de Tc, il faut extraire environ 450 KJ, soit avoir une efficacité d'extraction d'environ 250 W si l'on souhaite arriver à ce résultat en une demi-heure, c'est un vrai challenge.

Il a été suggéré depuis longtemps que les bains froids étaient les plus efficaces pour refroidir rapidement un sujet. Cependant, une critique de bon sens a rapidement été formulée, portant sur le fait que plus le refroidissement cutané est intense, plus il provoque une vasoconstriction ayant deux effets thermiques contreproductifs : une diminution des échanges thermiques par convection entre le noyau et la peau, d'une part, et une augmentation de l'épaisseur de l'enveloppe thermique du corps et donc de l'isolement thermique du noyau, d'autre part. De plus, réaliser une immersion thérapeutique en eau froide sur le terrain est certainement difficilement réalisable en toute sécurité.

Ce n'est que très récemment que des études contrôlées ont été réalisées en conditions rigoureuses (13-16). Elles démontrent clairement que l'impact de la réaction vasoconstrictrice au bain froid est réel puisqu'il explique qu'une immersion dans de l'eau à 8 °C n'est pas plus efficace que dans de l'eau à 20 °C mais qu'il peut être forcé par de l'eau très froide, à 2 °C, qui se révèle donc très efficace. Dans de telles conditions, Proulx, et al. ont montré que la défervescence thermique pouvait atteindre 0,4 °C.min^{-1}, alors qu'elle n'était que de 0,2 °C.min^{-1} dans de l'eau à 8 ou à 20 °C. En environnement chaud, réaliser un bain froid n'est possible que si l'on dispose de dispositifs thermo-contrôlés spécifiques permettant un accès aisé au patient. Ces moyens existent et beaucoup de stades de football américain en sont maintenant équipés aux États-Unis.

Les autres moyens d'induire un refroidissement sur le terrain ont été comparés récemment du point de vue de leur efficacité : aspersion-ventilation, pose de packs de glace sur les gros troncs veineux superficiels (cou et aines), perfusion rapide de 2L de sérum salé à 20 °C (17), refroidissement spécifique des mains par des bains

froids, utilisation de tenues à circulation d'eau ou d'air froid (18), etc. Dans ces travaux, la technique d'aspersion-ventilation se révèle régulièrement la plus efficace, confirmant les travaux plus anciens ; correctement réalisée, elle permet d'atteindre des niveaux de défervescence thermique supérieurs 0,1 °C.min^{-1}.

Cette technique vise à maintenir au niveau le plus élevé possible les transferts de chaleur par convection entre le corps et son environnement ce qui suppose : i) que le sujet soit dénudé, ii) que sa peau soit maintenue humide en permanence et iii) qu'elle soit soumise à un flux convectif d'air aussi intense que possible. L'application de linges humides est théoriquement moins efficace que l'aspersion puisqu'elle augmente l'isolement thermique du corps, elle ne peut donc se comprendre qu'en l'absence de personnels capables d'assurer correctement l'aspersion. En pratique, la technique d'aspersion-ventilation n'est pas difficile à mettre en œuvre : elle demande une attention particulière pendant toute la durée de son application, ce qui nécessite la présence d'un personnel dédié qui effectue en même temps la surveillance du patient. De plus, cette technique n'est vraiment efficace que si l'air ambiant n'est pas trop humide. Elle nécessite aussi que la température corporelle profonde soit surveillée.

Ce point est moins simple à réaliser qu'on peut le penser. En effet, si la température du noyau thermique est relativement homogène du fait de la convection sanguine, des différences peuvent cependant être constatées selon l'endroit où on la mesure, surtout pendant les phases transitoires de variation rapide, ce qui est l'objectif recherché du refroidissement. Les différentes techniques de mesures autres qu'anales ont été évaluées récemment pour leur capacité à fournir une évaluation fiable de Tc sur le terrain (19) ; toutes ont été considérées comme invalides, les techniques fondées sur la mesure de la température tympanique ou du conduit auditif étant moins mauvaises que les techniques orales, axillaires ou cutanées sur le front. Quel que soit le moyen d'évaluation de Tc, il faut garder à l'esprit que les risques d'erreur sont liés à une contamination thermique qui minore toujours la valeur mesurée. Ce point est particulièrement important si l'on veut suivre une défervescence thermique qu'il convient de ne pas créer artificiellement par des erreurs de mesure.

Jusqu'à quel niveau de température corporelle amener le patient si l'on dispose d'un moyen de refroidissement efficace ? Le seul consensus qui prévaut actuellement est d'intervenir vite et énergiquement pour amorcer la défervescence thermique aussi rapidement que possible. En effet, si l'on dispose d'un moyen de mesure de Tc profond et que l'on effectue un refroidissement cutané, ce qui est la situation la plus fréquente, le phénomène de vasoconstriction cutanée et de redistribution vasculaire qu'elle provoque peut retarder le moment où Tc commence à décroître. La constatation d'une diminution effective de Tc est, dans ces conditions, un point d'importance majeure.

Une fois que Tc a commencé à décroître, sa diminution peut sembler relativement rapide. Avec les méthodes externes de refroidissement, plus elle est rapide, plus elle est inhomogène, c'est-à-dire qu'elle est plus importante au niveau cutané qu'au niveau central et donc que la baisse de Tc peut se prolonger à l'arrêt du refroidissement, du fait de l'homogénéisation des températures corporelles qui se produiront alors (phénomène de l'*after-drop* observé lors du réchauffement des hypothermies). C'est la raison pour laquelle plusieurs auteurs ont proposé que le refroidissement soit arrêté quand Tc atteint environ 38,5 °C (14, 20) ; ceci ne vaut que lorsque le refroidissement est obtenu avec des bains glacés. Quand le refroidissement est obtenu par aspersion-ventilation, par exemple, le risque d'*after-drop* est quasi-nul, rien ne s'oppose alors à ce que le refroidissement soit maintenu jusqu'à ce que Tc atteigne des valeurs sub-normales. Dans tous les cas, s'il est possible de mettre en place une une voie veineuse il faut le faire ; dans ce cas, la perfusion de 500 mL de sérum salé à 20 °C contribue à faire baisser Tc d'un peu plus de 0,1 °C sans aucun danger.

Mais en situation de terrain, il est vraisemblable que le problème de l'évacuation se pose avant que le patient n'ait retrouvé un niveau normal de Tc puisque cela peut prendre plusieurs dizaines de minutes. Le plus souvent, l'évacuation médicalisée se fait par moyen terrestre peu propice au maintien d'une technique de refroidissement efficace. Il peut donc être difficile de faire un choix entre poursuivre une manœuvre de refroidissement efficace et évacuer. Il n'est pas possible actuellement de proposer de guideline qui puisse s'appliquer de façon univoque à toutes les situations. L'urgentiste confronté sur le terrain à un patient présentant à l'évidence un CCE grave doit prendre en compte l'efficacité des techniques de refroidissement qu'il peut mettre en œuvre sur place et dans le moyen de transport, la durée de l'évacuation et l'efficacité de la réanimation qui sera effectuée à l'hôpital d'accueil.

Le refroidissement à l'hôpital

À l'hôpital, le problème du refroidissement se pose avec la même acuité que sur le terrain même si les moyens de le résoudre sont différents (20). En effet, il apparaît maintenant clair que les techniques de refroidissement internes sont très efficaces pour la prise en charge d'urgence des patients hyperthermiques, en coup de chaleur classique ou d'exercice (20, 21). En effet, les techniques internes, fondées soit sur l'emploi de systèmes de circulation extracorporelle ou d'hémodialyse, ont pour effet de refroidir directement le sang retournant au noyau thermique. Dans ces conditions, un refroidissement théorique 50 W par litre.min^{-1} de sang et par °C de différence de température entre les entrées et les sorties peut être obtenu. Il s'agit cependant de moyens lourds, difficiles à mettre en œuvre, qui ne sont pas toujours disponibles et ont leur propre iatrogénicité.

Quand de tels moyens ne peuvent être employés, les techniques de refroidissement analogues à celles utilisées sur le terrain doivent alors être utilisées, souvent rationnalisées par l'emploi de ventilateurs et parfois de nébuliseurs électriques (20, 22) qui allègent les tâches d'aspersion-ventilation. La question de savoir si le sujet doit être placé en chambre climatisée ou non reste ouverte. En effet, plus l'air est chaud, plus il est capable de contenir de vapeur d'eau, et donc plus il est efficace pour

assurer l'évaporation de l'humidité cutanée, si, et seulement si, son hygrométrie spontanée n'est pas trop élevée. Il est donc plus efficace de ventiler avec de l'air sec et chaud qu'avec de l'air froid, mais les valeurs limites ne sont pas aisément accessibles. De plus, il est nécessaire de veiller à ce que l'hygrométrie de la pièce dans laquelle un dispositif d'aspersion-ventilation fonctionne n'augmente pas trop, sous peine d'obérer l'efficacité du dispositif. À l'hôpital aussi, la technique utilisée doit donc être adaptée à la situation, par exemple en utilisant un local climatisé à un niveau de température relativement élevé ce qui assure que l'air y soit maintenu relativement sec tout en optimisant l'évaporation de l'humidité cutanée.

Dans tous les cas, une réanimation vigilante doit être immédiatement entreprise, visant à s'opposer à une évolution défavorable vers le syndrome de réponse inflammatoire systémique et la défaillance multiviscérale ce qui n'est pas aisé en l'absence de thérapeutique spécifique. Le succès dans ce cadre de l'hypothermie contrôlée a été très récemment rapportée (23).

Conclusion

L'analyse des transferts de chaleur, au sein de l'organisme et entre le corps et l'environnement, permet de mieux comprendre les facteurs concourant à l'hyperthermie d'exercice, d'une part, et au refroidissement qu'il faut toujours mettre en œuvre de façon efficace lors de la prise en charge des CCE. Cette analyse met au premier plan l'interdépendance des différents facteurs externes qui contribuent à l'hyperthermie d'exercice : l'intensité et la durée de l'effort imposé, les facteurs climatiques et les facteurs vestimentaires. Au cours des épreuves réalisées en treillis, en particulier les marche-courses effectuées avec charge, la charge thermique que ces facteurs imposent peut être considérable ; c'est ce qui explique que ces épreuves soient les plus pourvoyeuses d'accidents hyperthermiques. Dans ces conditions, des actions éventuellement modestes à l'échelon unitaire peuvent cumuler leurs effets pour réduire le nombre et la gravité des accidents. Il est donc indispensable que la surveillance de ces activités à risque prenne en compte ces actions. En cas d'accident hyperthermique, le refroidissement s'impose. La compréhension des conditions de l'efficacité des moyens de refroidissement que l'on est capable de mettre en œuvre peut permettre de l'améliorer, en particulier l'importance du facteur évaporation.

Points à retenir

– l'exercice physique intense et prolongé génère toujours une hyperthermie dont le niveau est d'autant plus élevé que l'intensité de l'exercice est importante, les conditions météorologiques défavorables (température et humidité élevées, absence de vent) et les vêtements portés isolant au plan thermique ;

– quand le diagnostic de coup de chaleur d'exercice est porté, un refroidissement efficace doit immédiatement être mis en place. La technique la plus efficace sur le terrain est celle d'aspersion-ventilation qui doit être complétée, quand cela est possible, par la perfusion de 500 mL de sérum salé physiologique, si possible rafraichi ;

– si un refroidissement par aspersion-ventilation efficace a pu être mis en place sur le terrain, il doit impérativement être poursuivi dans le moyen d'évacuation ; à défaut, il vaut mieux poursuivre le refroidissement sur le terrain et retarder l'évacuation.

DOSSIER

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Brotherhood JR. Heat stress and strain in exercise and sport. J Sci Med Sport 2008;11 h 6-19.
2. « Manuel d'entraînement physique militaire et sportif » Directive-11-008039 DEF/EMA/RH/NP du 12 octobre 2011 (Publication interarmées PIA-7.1.1, EPMS): 63-72.
3. Banzet S, Koulmann N, Bourdon L. Activité physique et hyperthermie. Med Armées 2012, ce numéro.
4. Koulmann N, Banzet S, Bigard AX. L'activité physique à la chaleur : de la physiologie aux recommandations d'apport hydrique. Med Trop 2003;63:617-26.
5. Byrne C, Lee JK, Chew SA, Lim CL, Tan EY. Continuous thermoregulatory responses to mass-participation distance running in heat. Med Sci Sports Exerc. 2006;38:803-10.
6. Desgorces FD, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, Tafflet M, et al. From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. PLoS One. 2008;3:e3653.
7. Sauvet F, Chennaoui M, Banzet S, Bourrilhon C, Canini F, Koulmann N, et al. Coup de chaleur d'exercice, système cardiovasculaire et vulnérabilité systémique. Méd. Armées 2012, ce dossier.
8. Yaglou CP, Minard D. Control of heat casualties at military training centers. AMA Arch Ind Health 1957;16:302-16.
9. Besnard Y, Launay JC, Guinet-Lebreton A, Savourey G. PREDICTOL: a computer program to determine the thermo-physiological duration limited exposures in various climatic conditions. Comput Meth Progr Biomed 2004;76:221-8.
10. Nelson NG, Collins CL, Comstock RD, McKenzie LB. Exertional heat-related injuries treated in emergency departments in the US. 1997-2006. Am J Prev Med 2011;40:54-60.
11. Yard EE, Gilchrist J, Haileyesus T, Murphy M, Collins C, McIlvain N et al. Heat illness among high school athletes - United States, 2005-2009. J Safety Res 2010;41:471-4.
12. Armstrong LE, Johnson EC, Casa DJ, Ganio MS, McDermott BP, Yamamoto LM, et al. The American football uniform: uncompensable heat stress and hyperthermic exhaustion. J Athl Train 2010;45:117-27.
13. Proulx CI, Ducharme MB, Kenny CP. Effect of water temperature on cooling efficiency during hyperthermia in humans. J Appl Physiol 2003;94:1317-23.
14. Proulx CI, Ducharme MB, Kenny CP. Safe cooling limits from exercise-induced hyperthermia. Eur J Appl Physiol 2006;96:434-45.
15. Gagnon D, Lemire BB, Casa DJ, Kenny GP. Cold-Water Immersion and the Treatment of Hyperthermia: Using 38,6 °C as a safe rectal temperature cooling limit. J Athl Train 2010;45:439-44.

16. McDermott BP, Casa DJ, Ganio MS, Lopez RL, Yeargin SW, Armstrong LE, et al. Acute whole-body cooling for exercise-induced hyperthermia: a systematic review. J Athl Train 2009; 44:84-93.
17. Sinclair WH, Rudzki SJ, Leicht AS, Fogarty AL, Winter SK, Patterson MJ. Efficacy of field treatments to reduce body core temperature in hyperthermic subjects. Med Sci Sports Exerc, 2009;41:1984-90.
18. Barwood MJ, Davey S, House JR, Tipton MJ. Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions. Eur J Appl Physiol 2009;107:385-96.
19. Casa DJ, Becker SB, Ganio MS, Brown CM, Yeargin SW, Roti MW, et al. Validity of devices that assess body temperature during outdoor exercise in the heat. J Athl Train 2007;42:333-42.
20. Rousseau JM, Libert N, Dubost C, Pelletier C, Batjom E, Bonnefoy S. Coup de chaleur d'exercice : comment refroidir ? Réanoxyo 2008;24:21-4.
21. Yue H, Zhou F, Liu H, Kang H, Pan L, Gu B, et al. Fatal exertional heat stroke successfully treated with cold hemofiltration: a case report. Am J Emerg Med 2009;27:751.e1-751.e2.
22. Hoedemaekers CW, Ezzahti M, GerritsenA, van der Hoeven J. Comparison of cooling methods to induce and maintain normo- and hypothermia in intensive care unit patients: a prospective intervention study. Critical Care 2007;11:R91.
23. Hong JY, Lai YC, Chang CY, Chang SC, Tang GJ. Successful treatment of severe heatstroke with therapeutic hypothermia by a noninvasive external cooling system. Ann Emerg Med 2011 (in press).

INFORMATION

Afin d'assurer un suivi régulier de l'acheminement de la revue « Médecine et Armées », merci de faire parvenir à la rédaction tous changements d'adresse d'affectation.

« Médecine et Armées » M^me M. SCHERZI
1 place Alphonse Laveran 75230 Paris Cedex 05

e-mail : medarmees@hiavdg.org
Lotus : martine.scherzi@sante.defense.gouv.fr
Tél. : 01 40 51 47 44
Fax. : 01 40 51 51 76