

# Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : *les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT)*

## AUTEURS :

J.P. Meyer <sup>1</sup>, E. Turpin-Legendre <sup>1</sup>, L. Gingembre <sup>2</sup>, F. Horvat <sup>1</sup>, G. Didry <sup>1</sup>,

1. Département Homme au Travail, INRS

2. Aster, service de santé au travail, Épinal

EN  
RÉSUMÉ

Les méthodes classiques d'évaluation des astreintes thermiques sont peu adaptées lors des expositions brèves, intenses à la chaleur ou lors du port de tenue étanche. Au cours d'études de terrain sur le travail à la chaleur, les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT) et la température buccale (tbu, en °C) ont été mesurées chez 98 salariés occupant 18 postes de travail différents. La relation entre la variation de la tbu entre le début et la fin d'une exposition (dtbu) et les EPCT est de la forme :  $dtbu = 0,03 EPCT$ . Ainsi, les EPCT doivent être inférieures à 20 bpm pour que la dtbu de 95 % d'une population exposée soit inférieure à 1 °C, valeur préconisée par les normes internationales.

## MOTS CLÉS

Fréquence cardiaque / astreinte thermique / travail à la chaleur

## INTRODUCTION

Les transformations du travail au cours des dernières décennies, marquées principalement par de nouveaux modèles productifs, la baisse des effectifs industriels au profit du tertiaire, la mécanisation, l'automatisation et la substitution des exigences mentales aux pénibilités physiques laissent à penser que les contraintes physiques portent sur un nombre plus restreint de salariés. Or, de nombreuses enquêtes attestent de la persistance de pénibilités physiques et de dangers à plus ou moins long terme de celles-ci pour la santé [1 à 3]. En particulier, l'exposition à des contraintes thermiques importantes, occasionnées par des processus de production, est rapportée par plus d'un salarié sur 5 [1]. En Europe, l'exposition à la chaleur plus de 25 % du temps de travail est rapportée par 45 % de Roumains et de Grecs mais seule-

ment 14 % d'Irlandais ou d'Estoniens [2]. Ces données montrent que le climat reste un déterminant essentiel des contraintes thermiques et que le travail en extérieur peut toujours exposer à ce risque.

Dans les fonderies, les aciéries, les hauts fourneaux, les verreries et les boulangeries, la principale source de chaleur réside dans les fours et les matières très chaudes ou en fusion. Ces expositions sont souvent discontinues et brèves mais représentent un niveau de contrainte élevée [4]. Par ailleurs, la généralisation de démarches « qualité » impose des tenues de protection étanches dans de nombreux secteurs aussi variés que l'agroalimentaire, la chimie, la pharmacie, l'électronique. Ces tenues génèrent des contraintes thermiques car elles limitent les capacités de l'organisme à réguler sa température interne et sont d'autant plus à risque

## Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les expirations cardiaques thermiques (EPCT)

que la charge physique associée est élevée et que les salariés exposés ne sont pas toujours acclimatés à la chaleur [5 à 7]. En effet, ce sont souvent des hommes, jeunes, ouvriers intérimaires ou salariés d'une entreprise extérieure qui sont affectés à ces tâches sous contrainte thermique et sont particulièrement exposés au risque car peu acclimatés, ignorant leur environnement de travail et peu avertis des indicateurs physiologiques de risque [8, 9].

Les résultats de l'enquête de 2004 de la Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques (DARES) montrent que l'exposition à des contraintes thermiques est associée à des accidents de travail plus nombreux [3]. Cette enquête confirme ainsi la persistance du risque accru d'accidents lié à des environnements chauds déjà montré par les travaux de Ramsey et al. [10]. Selon les données de l'enquête SUMER en 2003, la contrainte thermique augmente de 17 % le risque d'accident avec arrêt ; cela affecte 8,5 % des salariés exposés à cette contrainte au cours de l'année écoulée [1]. D'autres études ont mis en évidence que les salariés exposés à la chaleur seraient plus fatigués en fin de journée que ceux travaillant sans contrainte thermique [11, 12]. Des altérations de performance apparaissent pour des déshydratations de 3 % [13]. Il est donc important d'évaluer ces contraintes pour prévenir efficacement leurs risques.

Le premier risque de l'exposition à une contrainte thermique chaude est l'hyperthermie. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) émettait en 1969 une recommandation relative à la limite de température centrale dans son rapport technique n° 412 [14]. Il y est notamment écrit : « *Il est déconseillé que la tem-*

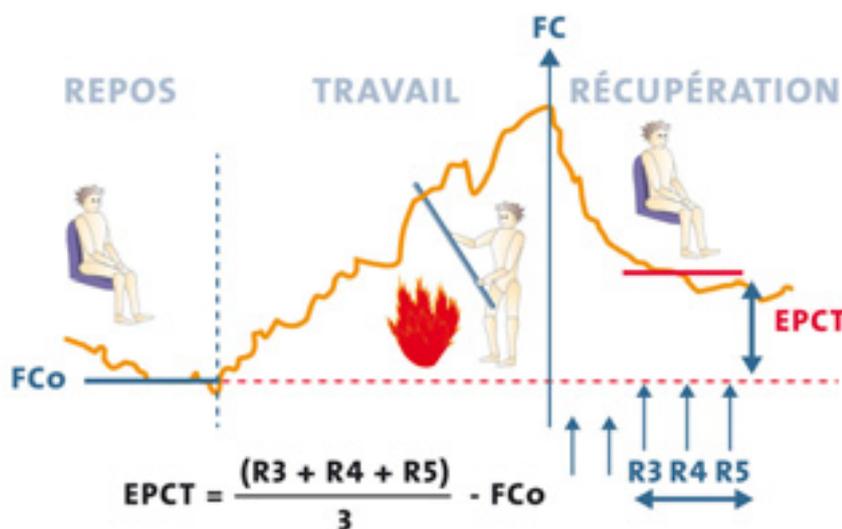
*pérature corporelle centrale dépasse 38 °C au cours d'une exposition quotidienne prolongée à un travail intense* ». Des études portant sur la température rectale de groupes de mineurs en Afrique du Sud [15] et des données plus récentes [16] montrent que si ce seuil moyen est retenu, la probabilité d'atteindre une température de 39,2 °C, seuil de premiers troubles, est de  $10^{-4}$  soit moins d'une personne à risque pour 10 000 et la probabilité d'atteindre une température de 42 °C, seuil de risque létal est de  $10^{-7}$  soit moins d'une fois tous les 40 ans pour 1 000 salariés exposés 250 jours par an. Ce seuil de 38 °C permet donc de protéger de façon satisfaisante une population exposée. Un travail de normalisation a abouti à une recommandation qui tient compte de la variabilité interindividuelle et ne préconise plus un seuil absolu de température centrale mais une augmentation de 1 °C de celle-ci comme limite admissible d'astreinte [17].

La variété des approches et la complexité de certains indices imposent de disposer d'un matériel et de compétences spécialisés. Par ailleurs, l'impossibilité d'appliquer ces normes dans des situations de plus en plus fréquentes (contraintes instables ou brèves, combinaison étanche) décourage leur utilisation en milieu de travail [4]. Pour résoudre les difficultés d'évaluation de ces contraintes, le recours à des mesures physiologiques pour déterminer l'acceptabilité des conditions de travail est recommandé [9, 17 à 19]. De telles approches ont été proposées par Moran et al. [20] et Tikuisis et al. [21]. Les premiers ont combiné les variations de la fréquence cardiaque (FC) et de la température rectale au cours du travail dans un « indice de stress prédit » (PSI) alors que Tikuisis et al. [21] ont

basé leur « indice de stress perçu » (PeSI) sur les évaluations subjectives conjointes de l'effort et de la température. L'indice PeSI répond à la même volonté d'évaluer la réponse individuelle à une contrainte thermique que l'indice PSI. Ces 2 indices sont assez proches dans la démarche et évaluent l'astreinte entre 0 et 10. Très précis en situation de laboratoire, ils n'ont pas été validés en situation réelle de travail. Le PeSI utilise une évaluation subjective qui le rend peu sûr si un petit nombre de salariés est exposé. Le PSI est de mise en œuvre plus compliquée car il impose au cours du travail les recueils de la FC et de la température corporelle [20, 22]. L'augmentation de la FC de repos, illustrée par le concept des expirations cardiaques thermiques (EPCT) proposé par Vogt et al. [23] (figure 1), est la méthode la plus simple pour quantifier l'astreinte thermique [23 à 25]. En effet, à l'arrêt du travail, la FC diminue rapidement. Cette première phase de décroissance correspond à la composante métabolique de la FC qui aura pratiquement disparu après 1 minute de repos [26 à 28]. Cette durée peut être plus longue dans de rares cas de travail très intense, mais ne dépasse pas 3 minutes [29]. Subsiste alors principalement l'élévation d'origine thermique de la fréquence cardiaque (EPCT). Sa décroissance est beaucoup plus lente, car liée à la baisse progressive de la température corporelle, qui dépend de la dissipation de chaleur. L'intérêt de la FC est renforcé par le fait que son élévation précède les réponses sudorales et l'augmentation des températures corporelles [30]. Le recueil de la FC en situation de travail permet de distinguer, même pour des expositions courtes, les 2 composantes majeures de l'élévation de la FC : la

↓ Figure 1

Les extrapulSIONS cardiaques thermiques (d'après [23])



Les extrapulSIONS cardiaques thermiques (EPCT) correspondent à l'augmentation résiduelle de la fréquence cardiaque (FC) - à la fin d'un exercice ou d'une exposition à la chaleur - par rapport à son niveau de repos. Elles assurent l'augmentation du débit sanguin nécessaire au transfert de la chaleur accumulée dans le noyau (muscles) vers la peau où elle est dissipée (par convection et évaporation). Ce transfert est lent, ce qui explique que la FC de récupération puisse mettre plusieurs dizaines de minutes à revenir à sa valeur de repos initiale (FC<sub>0</sub>).

composante motrice (métabolique et statique) liée aux efforts musculaires du travail, appelée extrapulSIONS cardiaques motrices (EPCM) et la composante thermique liée à l'augmentation de la température centrale, les EPCT [8].

Les EPCT représentent une solution simple et sûre pour les préventeurs qui ont besoin de disposer d'indices adaptés, applicables et fiables pour la surveillance des salariés exposés à la chaleur. Déjà validées en situation de laboratoire, l'objectif de ce travail est de montrer la validité des EPCT sur un grand nombre de salariés dans des situations réelles et variées de travail à la chaleur.

## MÉTHODE

Trois études successives ont été menées dans différents secteurs industriels pour mesurer conjointement la contrainte thermique, les EPCT, la variation de température

buccale et la dépense énergétique. Quarante-vingt dix-huit hommes ont participé à ces études menées lors de 132 expositions dans 18 situations de travail différentes.

## POPULATION ET POSTES ÉTUDIÉS

L'âge, le poids et la taille ont été recueillis pour les 98 salariés. L'indice de masse corporelle (IMC en kg.m<sup>-2</sup>) a été calculé en divisant le poids (en kg) des sujets par le carré de leur taille (en m). Les capacités cardiorespiratoires maximales ont été évaluées avant le travail chez 88 sujets par un test d'effort sous-maximal afin de déterminer leur VO<sub>2</sub>max (en ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>), soit sur une bicyclette ergométrique à différentes puissances de pédalage (n = 60 salariés) soit sur un step-test (n = 28) [31]. La VO<sub>2</sub>max était calculée par extrapolation de la relation VO<sub>2</sub> = f(FC) obtenue lors du test d'effort à la valeur maximale théorique de FC du salarié soit : 220-âge [32]. Dix salariés n'ont pas réalisé le test

en raison de difficultés techniques ou de leur manque de disponibilité. Les 18 situations de travail observées au cours des 3 études successives sont résumées ci-dessous.

**L'étude 1** a été menée sur 60 hommes, 5 par poste dans 11 entreprises et 5 sujets d'expérience dans une simulation de travail en ambiance à contrainte radiante très élevée. Ces postes se répartissaient comme suit :

- 4 postes de moulage caractérisés par une humidité relative élevée : 2 en fromagerie industrielle et 2 en fabrication de cuvettes de WC ;
- 5 postes où le principal facteur de contrainte thermique était une température de rayonnement élevée : 2 postes en fonderie, 1 en verrerie, 1 en boulangerie industrielle et 1 en simulation en laboratoire ;
- 1 poste de mineur dans une mine de potasse comportant une contrainte convective élevée ;
- 1 poste de soudeur dans un générateur de vapeur de centrale nucléaire associant des contraintes radiantes et convectives élevées ;

**Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les expulsions cardiaques thermiques (EPCT)**

● 1 poste à contrainte modérée en traitement de surface de turbine en aluminium.

Dans les 11 situations réelles de travail, le recueil des données a toujours été réalisé pendant les 4 premières heures de travail. L'exposition dans la condition de laboratoire durait 1 heure.

**L'étude 2** était intégrée à une analyse ergonomique du poste d'opérateur en papeterie dans une machine à sécher le papier. Parmi les salariés participant à cette étude, 9 sont intervenus dans la machine où ils ont été exposés à des températures d'air (45,2 +/- 17,4 °C) et des humidités relatives (66 +/- 13 %) très élevées du fait du processus d'évaporation forcée de l'eau du film de papier. Les interventions dans la machine étaient imprévisibles et consécutives à des incidents qu'il fallait réparer au plus vite. En conséquence, la dépense énergétique de ces tâches était élevée. Les durées d'exposition brèves, inférieures à 50 minutes, pouvaient se répéter de façon aléatoire au cours du poste. Les expositions de chaque salarié pouvaient être différentes en durée et en type d'activité. Elles étaient alors prises en compte, ce qui explique que certains salariés ont fait l'objet de 2, voire 3 enregistrements.

**L'étude 3** a été menée dans des chantiers de désamiantage avec 21 salariés équipés d'une tenue étanche ventilée ou non. Lorsque la tenue étanche n'était pas ventilée, le salarié portait une protection respiratoire à ventilation assistée. Tous ces salariés, dont l'ancienneté était supérieure à 4 mois, étaient habitués au port des équipements de protection.

Au total, 98 salariés volontaires et en bonne santé, travaillant à 18 postes différents au cours de 132 expositions à une contrainte thermique ont participé à cette étude.

**VARIABLES MESURÉES**

**ÉVALUATION DE L'ASTREINTE THERMIQUE**

L'astreinte thermique a été évaluée par la mesure en continu de la fréquence cardiaque (FC), ainsi que les variations de la température buccale (dtbu) et du poids corporel pour calculer les pertes sudorales.

**a)** La FC a été enregistrée en continu par télémétrie (Hellige Servomed®) dans l'étude 1 et par cardiofréquence-métrie (Polar PE 4000® ou Polar Vantage NV®) dans les études 2 et 3. Bien qu'analysés avec des logiciels différents, les mêmes paramètres de FC en battement par minute (bpm) ont été calculés dans les 3 études. La FC était comptée par période de 15 secondes. Cinq paramètres de la FC ont été calculés :

- la FC de repos avant l'exposition (FCo) est la moyenne de la FC mesurée pendant 5 minutes avant le début du travail, en position assise et en ambiance neutre ;
- la FC de repos après l'exposition (FCr) est la moyenne des FC mesurées aux minutes 3, 4 et 5 de récupération après la fin du travail, en position assise et en ambiance neutre [8] ;
- la FC de travail (FCw) est la FC moyenne calculée pendant toute la durée de travail à la chaleur ;
- le coût cardiaque absolu (CCA en bpm) est la différence FCw - FCo ;
- les EPCT (en bpm) ont été calculées selon la relation :

$$EPCT = FCr - FCo [8].$$

**b)** La température corporelle utilisée est la température buccale (tbu). Elle est mesurée au repos, assis avant et après l'exposition à la chaleur à l'aide d'une thermistance à usage unique placée sous la langue. La précision du capteur est de 0,1 °C (Craftemp®). Un temps de repos de 5 minutes bouche fermée a été respecté avant la lecture de la tbu pour éviter les échanges

avec l'air extérieur [33]. En pratique, la tbu a été mesurée lors de chaque repos de 5 minutes des salariés. La variation de la température buccale (dtbu) entre les mesures réalisées avant et après l'exposition a pu être calculée pour chaque exposition.

**c)** Les pertes sudorales ont été mesurées dans l'étude 1 en pesant les salariés avant et après chaque exposition et chaque passage aux toilettes sur une balance romaine (+/- 20 g) et en pesant les ingests sur une balance de précision (+/- 5 gr). Les salariés de l'étude 3 ont été pesés équipés de leur combinaison étanche avant et après chaque exposition. Les pertes sudorales n'ont pas été mesurées dans l'étude 2 car les vêtements des sujets étaient trempés en sortant de la zone d'exposition par la condensation d'un mélange de sueur et de vapeur d'eau.

**ÉVALUATION DE LA CONTRAINTE THERMIQUE**

La contrainte thermique est évaluée en mesurant ses paramètres physiques et en mesurant ou en évaluant l'isolement vestimentaire et la dépense énergétique (M) des salariés.

**a)** Paramètres physiques de l'ambiance thermique. Les températures sèche (ta) et humide de l'air (th) ont été mesurées à l'aide d'un psychromètre à chaque poste de travail lors des 3 expériences. La vitesse de l'air (Va) et la température de rayonnement (tr) ont été mesurées par un anémomètre et un thermomètre de globe noir dans l'expérience 1. Elles ont été estimées dans les 2 autres expériences, compte tenu des conditions ambiantes. Dans l'étude 1, les recueils de tous les paramètres de contrainte ont été réalisés de façon extrêmement rigoureuse en conformité avec les critères édic-

tés par les normes afin de calculer l'indice d'astreinte thermique prévu [34]. La pression partielle de vapeur d'eau ( $P_{aH_2O}$ ) et l'humidité relative ( $hr$ ) ont été calculées à partir de  $ta$  et de  $th$ . Les situations de travail ont été classées selon le type de contrainte : une température d'air ( $ta$ ) ou de rayonnement ( $tr$ ) supérieure à  $40\text{ }^\circ\text{C}$  représente une contrainte convective ou radiante élevée, une température humide ( $th$ ) supérieure à  $20\text{ }^\circ\text{C}$  définit une ambiance humide et une dépense énergétique supérieure à  $250\text{ W}$  correspond à un métabolisme important.

**b)** L'isolement vestimentaire (unité : clo) a été évalué selon les recommandations de la norme X35-206 [35] pour les vêtements classiques de travail. Pour les tenues étanches, l'isolement pris en compte était celui indiqué par le fabricant.

**c)** Le métabolisme énergétique ( $M$ ) a été évalué selon 3 méthodes. Dans l'étude 1,  $M$  a été calculé à partir de la consommation d'oxygène ( $VO_2$ ) mesurée avec un appareil portable (Oxycon P®) pour chaque salarié pendant 2 à 4 séquences de travail réel d'une durée comprise entre 8 et 20 minutes en fonction de leur activité. Le calcul de  $M$  sur l'ensemble de la période de travail était réalisé selon la relation  $M = f(FC)$  calculée à partir des mesures de  $VO_2$  et de  $FC$  pendant les séquences de travail [36]. Dans les études 2 et 3,  $M$  a été déterminé à partir de la  $FC$  enregistrée en continu pendant le travail en utilisant la relation  $VO_2 = f(FC)$  établie pour chaque salarié au cours du test d'effort sur step-test. La  $VO_2$  a été convertie en Watt en utilisant un équivalent énergétique de  $340\text{ W}$  par litre d' $O_2$  consommé par minute [32].

#### TRAITEMENT DES DONNÉES

Les moyennes et les écarts types (et) des paramètres thermiques,

ont été calculés. Dans l'étude 1, l'indice d'astreinte thermique prévisible (ATP) a été calculé selon la démarche proposée par la norme X35-204 [34]. Le logiciel Cardlog (Polar®) a permis de calculer les moyennes de  $FC$  avant ( $FC_0$ ), pendant ( $FC_w$ ) et après ( $FC_r$ ) l'exposition à la chaleur dans les études 2 et 3. Un logiciel spécifique développé pour les besoins de l'étude était utilisé pour les mêmes calculs dans l'étude 1. Des régressions simples et multiples, pas à pas, ont permis d'analyser les relations entre la  $dtbu$ , les EPCT et les différents paramètres qui influencent la  $FC$ . Les données ont été traitées avec le logiciel Statgraphics®. Le seuil de significativité retenu était de 5 %.

## RÉSULTATS

### CARACTÉRISTIQUES DES SUJETS

La population étudiée comprend 98 hommes en bonne santé acclimatés à la chaleur, dont l'ancienneté dans la tâche était toujours su-

périeure à 15 jours. Les moyennes et écarts-types (et) des principales caractéristiques des salariés étaient de 32,8 (et = 8,1) années pour l'âge, 72,6 (et = 10,3) kg pour le poids, 1,74 (et = 0,07) m pour la taille et 23,9 (et = 3,1) pour l'indice de masse corporelle (IMC). La  $VO_{2,max}$  moyenne était 41,8 (et = 10,0)  $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  ce qui correspond à des capacités légèrement supérieures au niveau moyen pour des hommes des plages d'âge étudiées [31]. Il n'existe pas de différence significative entre les résultats moyens de  $VO_{2,max}$  établies sur bicyclette ou sur step-test ( $p > 0,2$ ).

### CONTRAINTE THERMIQUE

Les valeurs moyennes, les écarts-types et les valeurs extrêmes des paramètres physiques de la contrainte thermique ( $ta$ ,  $tr$ ,  $th$ ,  $hr$  et  $Va$ ) et du métabolisme ( $M$ ) sont présentés dans le [tableau I](#).

L'isolement vestimentaire moyen est de 0,82 (et = 0,46) clo. La valeur minimale de 0,1 clo correspond à un sujet en short (mineur) et la valeur maximale de 1,6 correspond au clo d'un vêtement de protection

↓ **Tableau I**

#### ➤ PARAMÈTRES PHYSIQUES DE LA CONTRAINTÉ THERMIQUE

	Moyenne (écart-type)	Extrêmes
$ta$ ( $^\circ\text{C}$ )	30,7 (9,8)	18 – 67
$tr$ ( $^\circ\text{C}$ )	35,5 (13,1)	20,5 – 71,9
$th$ ( $^\circ\text{C}$ )	21,1 (8,5)	11,5 – 56
$hr$ (%)	43 (18)	14 – 87
$Va$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )	0,65 (0,40)	0,13 – 1,5
$M$ (Watt)	293 (144)	109 – 1076

$Ta$  : température sèche de l'air  
 $Tr$  : température moyenne de rayonnement  
 $Th$  : température humide  
 $Hr$  : humidité relative  
 $Va$  : vitesse de l'air  
 $M$  : dépense énergétique

**Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT)**

étanche dans le désamiantage de l'étude 3.

La durée moyenne d'exposition est de 148 min. Dix pour cent des expositions sont inférieurs à 16 minutes et 25 % à 75 minutes. Dans l'étude 1, tous les enregistrements ont été réalisés durant les 4 premières heures du poste de travail.

**ASTREINTE THERMIQUE**

Les résultats des astreintes cardiaque et thermique relevées dans les 3 études sont présentés ici. De même, est effectuée une comparaison de la sudation observée dans l'étude 1 à celle calculée selon l'indice d'astreinte prévue (IAP) décrit dans la norme X35-204 [34].

a) Les résultats de l'astreinte cardiaque sont présentés dans le **tableau II** pour les FC de repos (FCo), les FC de travail (FCw), le coût cardiaque absolu (CCA) et les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT).

Les données du **tableau II** montrent que le champ exploré couvre un large spectre d'astreintes cardiaques allant de légères à très dures [32].

b) L'astreinte thermique (dtbu) moyenne est de 0,3 (et = 0,3) °C. La valeur la plus basse est de -0,5 °C,

soit une diminution de la température buccale pendant l'exposition. La dtbu la plus élevée est de 1,4 °C. Une dtbu supérieure à la limite de 1 °C préconisée par la norme X35-207 [17] a été mesurée dans 8 cas.

c) L'étude 1 avait pour objectif premier la comparaison de différents indices de contraintes thermiques [4]. Les résultats de l'indice d'astreinte thermique prévisible (ATP) [34] ont été comparés à la sudation mesurée (Sudmes). La relation entre les 2 indices (en g.h<sup>-1</sup>) est de la forme : Sudmes = 67 + 1,07 ATP

(**équation 1**)

**r<sup>2</sup> = 0,74 ; n = 60 ; p < 0,0001 ; écart-type du résidu (etr) = 81 g.h<sup>-1</sup>**

Le modèle proposé dans l'équation 1 est sensiblement amélioré par la prise en compte de paramètres individuels tels que la consommation maximale d'oxygène du salarié (VO<sub>2</sub>max en ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>) et le poids des boissons ingérées pendant l'exposition (g.h<sup>-1</sup>). L'équation 2 présente ce modèle : Sudmes = 145 + 0,94 ATP + 0,06 boisson - 2,1 VO<sub>2</sub>max

(**équation 2**)

**r<sup>2</sup> = 0,83 ; n = 60 ; p < 0,0001 ; etr = 73 g.h<sup>-1</sup>**

Le double intérêt de l'équation 1 et de sa comparaison à l'équation 2 est repris dans la discussion.

**RELATIONS ENTRE dtbu ET EPCT**

Les dtbu (en °C) et les EPCT (en bpm) sont liées par la relation : dtbu = 0,03 EPCT

(**équation 3**)

**r<sup>2</sup> = 0,70 ; n = 132 ; p < 0,0001 ; etr = 0,18 °C**

La **figure 2** présente les 132 couples de valeurs individuelles mesurées. La droite de régression moyenne (**équation 3**) est en trait plein et la limite de confiance unilatérale à 95 % des valeurs hautes de dtbu est en pointillé épais. Cette figure schématise le calcul de la limite de sécurité des EPCT pour tenir compte des variations interindividuelles. Elle permet d'assurer qu'en-deçà de cette dtbu (ligne en pointillé épais) il y a moins de 5 % de chance qu'au sein d'une population exposée à la chaleur, un salarié puisse dépasser une augmentation de 1 °C de température centrale. Cette limite de confiance unilatérale est calculée en considérant que : [dtbu de sécurité + (1,65 etr)] ne doit jamais dépasser 1 °C.

Comme etr dans l'équation 3 est de 0,18 °C, la dtbu de sécurité est de 0,69 °C (1 - (1,65 x 0,18)) soit, selon l'équation 3, une valeur limite d'EPCT de 21 bpm. En conséquence, si les EPCT sont égales ou inférieures à 20 bpm, 95 % des salariés ne dépassent pas une dtbu de 1 °C et ne seront pas exposés à une astreinte excessive.

La **figure 2** illustre également qu'à une dtbu de 1 °C (pointillés horizontaux) correspond une variation moyenne d'EPCT de 33 bpm (pointillés verticaux). La relation entre la dtbu et les EPCT n'est pas significativement différente entre les 3 études (analyse de variance : F<sub>2,129</sub> = 1,2 ; p > 0,3). De même, elle n'est pas significativement différente entre un calcul sur 132 ou 98 expositions, soit une seule expo-

↓ **Tableau II**

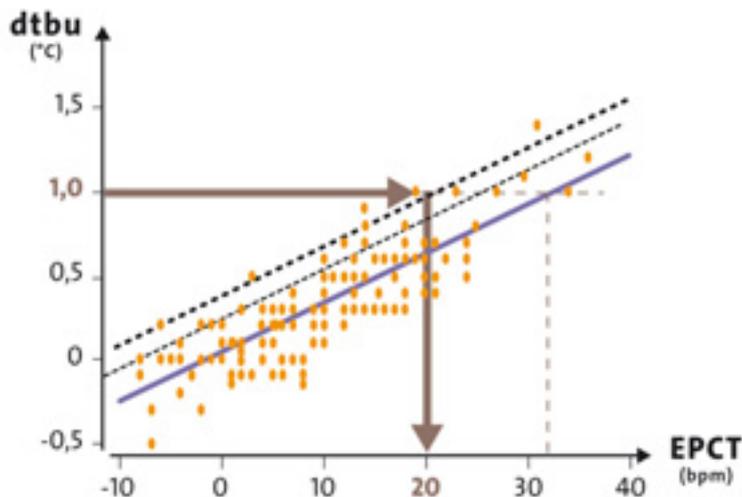
> **ASTREINTES CARDIAQUES**

	FCo	FCw	CCA	EPCT
Moyenne	77,5	110	32,8	9,5
Écart-type	12,4	20,6	17	9,3
Extrêmes	51 - 105	69 - 165	8 - 99	-8 - 36

FCo : fréquence cardiaque de repos  
 FCw : fréquence cardiaque de travail  
 CCA : coût cardiaque absolu  
 EPCT : extrapulsations cardiaques thermiques

↓ **Figure 2**

Représentation de la relation entre la dtbu (en °C) et les EPCT (en bpm).



Chaque exposition ( $n = 132$ ) est représentée par un point. La ligne continue représente la droite de régression moyenne. La ligne pointillée fine représente la moyenne + 1 etr (écart-type du résidu) et la ligne pointillée épaisse représente la moyenne +  $(1,65 \times \text{etr})$ . Moins de 5 % d'une population pourrait se retrouver « au-dessus » de cette ligne pointillée épaisse.

sition par salarié ( $p > 0,5$ ). Enfin, ni l'âge des sujets ( $p > 0,4$ ), ni l'isolement vestimentaire ( $p > 0,2$ ), ni la durée d'exposition ( $p > 0,05$ ) ne modifient l'équation 3. Cependant, la  $VO_2\text{max}$  et  $M$  peuvent être utilisés pour affiner significativement la prédiction de dtbu. Le modèle qui prend en compte la  $VO_2\text{max}$  (en  $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) et la dépense énergétique  $M$  (en  $\text{W.m}^{-2}$ ) issue de l'étude est de la forme :

(équation 4)

$r^2 = 0,71$  ;  $n = 111$  ;  $p < 0,0001$  ;  
 $\text{etr} = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C}$

Cette régression ne comporte que 111 points car elle est calculée à partir des 111 expositions des 88 salariés qui ont réalisé le test d'effort sous-maximal. Bien que les effets de la  $VO_2\text{max}$  et de  $M$  soient très significatifs ( $p < 0,005$ ), la précision de la prévision de dtbu n'est pas améliorée de façon sensible. En effet, l'etr de l'équation 4 est de  $0,17 \text{ } ^\circ\text{C}$  alors qu'elle est de  $0,18 \text{ } ^\circ\text{C}$  dans l'équation 3. Ainsi, la connaissance de  $VO_2\text{max}$  et  $M$ , même s'ils améliorent significativement le

modèle mathématique de prédiction de dtbu à partir des EPCT, présentent peu d'intérêt en pratique car ils imposent des évaluations complexes sans apport utile en terme de prévention.

## DISCUSSION

Sont successivement abordées les questions relatives à la méthodologie, à la comparaison des résultats aux données de la littérature et enfin à l'apport pratique de cette étude au champ de la prévention des risques liés aux astreintes thermiques chaudes.

## MÉTHODES

Les mesures nécessaires au calcul des indices d'astreinte et de contrainte thermique normalisés sont complexes à réaliser [37]. Elles ont nécessité la présence de 4 personnes pour l'évaluation de chaque salarié dans l'étude 1 qui était une application stricte des méthodologies de calcul des indices normalisés [4]. De plus, lors d'un travail

en tenue étanche, la mesure des contraintes du milieu ambiant sous-estime les contraintes thermiques du microclimat créé entre la peau du salarié et le vêtement étanche. Dans ces conditions, l'évaluation du risque thermique par la seule mesure des paramètres d'ambiance peut s'avérer dangereuse car elle sous-estime toujours la contrainte réelle. En revanche, le recueil des EPCT, relativement facile à utiliser, permet d'obtenir des informations plus sûres sur l'astreinte thermique et la tolérance individuelle au travail en milieu chaud. Lors des 3 expériences, le recueil des données a été réalisé sur un grand nombre de salariés dont les caractéristiques individuelles étaient variées et dans des conditions couvrant une large plage d'ambiances thermiques de travail. À titre d'exemple, la  $VO_2\text{max}$  moyenne des 88 salariés qui ont réalisé ce test est de  $41,8 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ , soit une moyenne légèrement supérieure aux valeurs normales. Cependant, les valeurs extrêmes (21,7 et  $70,7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) reflètent des capacités faibles pour la première et des

## Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les expirations cardiaques thermiques (EPCT)

résultats de sportif de haut niveau pour la deuxième. De même, les paramètres des contraintes thermiques couvrent toutes les conditions habituelles de travail à la chaleur : ta varie de 18 °C à 67 °C, th de 11,5 °C à 56 °C et M varie de 109 W (travail très léger) à 1 076 W (travail très dur) [32]. En outre, à niveau de contrainte égal, la nature et l'intensité des réactions physiologiques varient d'un individu à l'autre. De nombreux facteurs peuvent modifier la FC comme : l'intensité et le type de travail musculaire, l'ambiance de travail (chaleur, bruit), la température corporelle, la digestion, le stress, le tabac, l'horaire... [8]. À titre d'exemple, dans la présente étude, la FCo des fumeurs est significativement supérieure de 10 bpm à celle des non-fumeurs ( $p < 0,001$ ). Les effets de telles variabilités inter-individuelles n'ont pas pu être détaillés dans la présente étude. Elles constituent, pour une part, l'erreur résiduelle de l'équation 1. Cependant, le nombre de salariés et la variabilité des conditions dans lesquelles ont été recueillies les données de l'étude permettent de considérer que tous ces facteurs d'influence ont été pris en compte et que la relation moyenne (équation 3) et les limites de confiance des EPCT qui en découlent sont applicables dans la majorité des situations de travail. Seuls les effets liés au genre et aux horaires décalés n'ont pas été analysés. En effet, les résultats de FC au cours des périodes de recueil utilisés dans la présente étude ne sont pas ou peu affectés par le cycle nyctéméral. Par ailleurs, seuls des hommes ont participé à l'étude. L'effet du genre sur les adaptations à la chaleur reste discuté [38], bien que plusieurs études montrent qu'il est faible [28, 39]. Ces 2 facteurs de-

vraient faire l'objet d'études complémentaires en situation réelle de travail.

La température buccale a été choisie pour le mesurage de la température du noyau central du corps [17]. La température du noyau n'est pas une grandeur unique et mesurable en tant que telle mais peut être estimée par des températures en différents endroits du corps : œsophage, rectum, tractus gastro-intestinal, bouche, tympan, conduit auditif et urine. Les températures œsophagienne et rectale sont les plus couramment employées en laboratoire pour déterminer la température centrale. En milieu de travail, la température sublinguale est la plus fréquemment utilisée car sa mesure est facile et mieux acceptée par les salariés que celle de la température rectale par exemple. Elle est un indicateur fidèle et reproductible de la température centrale lorsque les conditions de mesure sont respectées [33]. La température sublinguale doit être prise au repos, capteur sous la langue contre le frein de la langue, bouche fermée pendant au moins 5 minutes. Le salarié ne doit pas absorber de boissons ni d'aliments chauds ou froids ou fumer dans les 15 minutes qui précèdent le début de la mesure.

### RELATIONS ENTRE LA dtbu ET LES EPCT

La validité des relations entre dtbu et EPCT repose sur au moins deux arguments : la concordance avec les données de la littérature, principalement recueillies en situation de laboratoire d'une part, et la participation d'un grand nombre de salariés et la variété des contraintes thermiques de leurs situations réelles de travail d'autre part. L'équation 3 indique qu'en moyenne 31 bpm d'EPCT

correspondent à une augmentation de 1 °C de dtbu. Ce résultat est similaire aux valeurs proposées dans la littérature. En laboratoire, Pirnay et al. [40], Kamon et Belding [41], Givoni et Goldman [42], Boisvert et al. [43] et Brazaitis et al. [39] trouvent respectivement que 32, 34, 39, 32 et 27 bpm d'EPCT correspondent à 1 °C d'augmentation de température centrale. Pour Vogt et al. [23], les EPCT sont de 33 bpm pour la même élévation de 1 °C de la température centrale. Au cours de séances de sauna, qui se caractérisent par une dépense énergétique faible, l'étude de Jezová et al. [38] décrit une augmentation de la FC de repos de 23 bpm pour une augmentation de 1 °C de la tbu chez les hommes et 33 bpm chez les femmes. L'étude de Kukkonen-Harjula et al. [44], également menée dans un sauna, montre une augmentation de FC de 31 bpm par degré d'augmentation de température centrale. Hasan et al. [45], toujours lors d'expositions au sauna, montrent qu'à 1 °C d'élévation de température centrale correspondent 30 bpm d'EPCT. Ainsi, les résultats de la présente étude sont en accord avec les données de la littérature bien que les conditions de recueil soient bien plus variées. En effet, à l'inverse de la présente étude, tous les résultats cités ont été mesurés en situation de laboratoire, sur un petit nombre de sujets exposés à 1 ou 2 contraintes thermiques. Aucune étude connue des auteurs ne s'approche, en termes de nombre de sujets ou de variétés des ambiances, de ce qui est analysé dans le présent travail. L'équation 4 montre que les capacités physiques et la dépense énergétique M peuvent être prises en compte pour améliorer le modèle de prédiction de l'astreinte thermique à partir des EPCT :

● les capacités physiques du sujet sont représentées par sa  $VO_2\text{max}$ . Plus cette dernière est élevée, plus la variation de température buccale est élevée pour une valeur d'EPCT donnée [7, 46]. Ainsi, à EPCT identiques, un salarié ayant une  $VO_2\text{max}$  plus élevée qu'un collègue aura aussi une dtbu plus élevée que celle de ce collègue. Ce constat rappelle l'importance de certaines caractéristiques individuelles dans les phénomènes de tolérance à la chaleur, notamment l'entraînement physique qui diminue à la fois l'élévation de la FC lors de l'exposition et la durée de récupération de la composante métabolique de la FC à l'arrêt de l'exposition à la chaleur [24, 47, 48] ;

● le métabolisme énergétique (M) influence le stockage de chaleur lors d'activités sportives [46] et sa prise en compte améliore le modèle prédictif de la dtbu. Ainsi, si 2 salariés ont des EPCT identiques, celui dont M est le plus élevé aura aussi une dtbu plus élevée.

La non-prise en compte de M et  $VO_2\text{max}$  (équation 3) entraîne une sous-estimation de la dtbu à partir des EPCT. Celle-ci est trop faible pour induire un risque réel d'hyperthermie. De plus, l'évaluation de ces 2 paramètres est délicate en pratique pour le préventeur et l'erreur sur le calcul de la dtbu peut être plus importante que l'amélioration du modèle de l'équation 4. Néanmoins, le fait de pouvoir mettre en évidence un effet significatif de M et de la  $VO_2\text{max}$  sur la relation entre EPCT et dtbu, témoigne de la qualité des mesures de cette étude de terrain. En effet, ces résultats, obtenus en situation de travail, illustrent des données physiologiques de base de la thermorégulation [7, 8, 32, 46]. De plus, la concordance entre les données de la littérature

et celles de la présente étude est renforcée par la comparaison des résultats des équations 1 et 2. En effet, la prédiction de la sudation observée, outre la variance expliquée par le modèle ATP (équation 1) est améliorée significativement lorsque les boissons et la  $VO_2\text{max}$  sont prises en compte (équation 2). Les évolutions induites par ces 2 facteurs, augmentation de la sudation lorsque les sujets sont mieux hydratés et diminution de la sudation chez ceux qui ont une  $VO_2\text{max}$  augmentée, sont conformes aux données publiées [13, 18 32].

### LIMITES D'UTILISATION DES EPCT

La détermination précise de la fréquence cardiaque de repos (FCo) en milieu de travail est difficile [9, 17]. Néanmoins, elle est indispensable pour le calcul des EPCT. L'adoption d'une FCo mal choisie peut conduire à des interprétations erronées. En effet, la nervosité d'un salarié peu habitué à des enregistrements de ce type peut être un facteur majeur d'augmentation de FCo. La méthode de choix pour déterminer la FCo est de calculer la FC moyenne pendant 5 ou 10 minutes de repos assis. Il est souvent utile d'équiper le salarié à l'avance afin de le laisser s'habituer au cardiofréquencemètre (CFM) et de prendre des pauses selon son choix, mais en respectant une pause assise sans parler pendant au moins 5 minutes. La FCo calculée à partir de percentiles de FC lors d'enregistrements de 24 h n'est pas adaptée au calcul des EPCT car le recueil de FCo doit être proche de la période d'exposition. En définitive, il appartient à celui qui pratique la mesure, au vu du décours temporel de la FC et de sa connaissance du travail réalisé, de déterminer la FCo la plus pertinente [5].

Lorsque la contrainte thermique est importante et doit être limitée dans le temps, la prise en compte des EPCT permet d'organiser l'alternance entre les périodes d'exposition à la chaleur et de récupération. Les durées limites doivent être déterminées en augmentant progressivement la durée d'exposition et en mesurant les EPCT après chaque exposition. La durée d'exposition initiale sera de 10 minutes et les durées des expositions ultérieures seront augmentées par palier de 10 minutes jusqu'à atteindre la durée limite d'exposition. Dans ce cas, la mesure des EPCT pour déterminer des durées d'exposition, nécessite une interruption du travail pour mettre le salarié au repos dans un milieu neutre et attendre que sa FC soit inférieure à FCo initiale + 10 bpm [9].

La principale limite de l'utilisation des EPCT comme indice d'astreinte thermique pour des expositions longues (> 1 h) est la non-prise en compte de l'astreinte sudorale. La FC est donc un bon indice dans la majorité des expositions à la chaleur mais n'est pas un indice suffisamment sûr lors de tâches de plus d'une heure qui exposent à un risque de déshydratation. Dans ces conditions, en plus du contrôle de l'astreinte thermique à l'aide de la FC, le mesurage des variations de poids des salariés est nécessaire pour contrôler l'astreinte sudorale et le risque de déshydratation. Enfin, la FC démontre la nécessité de réduire l'astreinte mais ne permet pas de définir les priorités d'une prévention technique. Lorsque celle-ci est envisagée, le calcul de l'indice d'astreinte thermique prévisible [34] est nécessaire pour déterminer l'origine du risque et bâtir une démarche ciblée de réduction de l'un ou plusieurs des paramètres de la contrainte en cause.

**Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les expirations cardiaques thermiques (EPCT)**

**EN PRATIQUE**

Dans l'étude 1, le recueil des données pour le calcul des indices a été réalisé de façon conforme aux standards de mesure les plus exigeants pour chaque paramètre de la contrainte. Cependant, les équations 1 et 2 illustrent la limite de précision du modèle ATP isolé (équation 1) et même lorsqu'il est amélioré par la prise en compte de la  $VO_{2,max}$  et du volume des boissons ingérées (équation 2). En effet, même dans ce cas, l'erreur de la prévision de la sudation est de +/- 117 g.h<sup>-1</sup> soit l'équivalent d'une variation de 1 °C de température corporelle en une heure pour un sujet de 80 kg.

Dans ce contexte, les EPCT représentent la méthode de mesurage de l'astreinte thermique la plus précise, la plus sûre et la plus simple. La prise du pouls reste aléatoire et difficile lorsque la FC est élevée. À l'heure actuelle, sa mesure doit se faire par un enregistrement continu au moyen d'un CFM et du transfert de ces données vers un ordinateur pour les traiter. Il s'agit d'appareils simples, peu coûteux et fiables, dont la mise en place est rapide et qui ne gênent pas les salariés dans leur travail. De plus, la FC est un indicateur plus précoce d'astreinte thermique que la température corporelle et la sudation [8, 30]. Enfin, la FC permet de déterminer M et son décours temporel qui sont des composantes majeures de l'astreinte thermique [6, 46, 47]. Les CFM actuels permettent d'enregistrer les données battement par battement et de calculer des paramètres d'arythmie cardiaque qui sont des indicateurs reconnus d'astreintes mentales et n'alourdissent pas ou peu le dépouillement des FC. Les logiciels de base pour l'analyse des données, disponibles en série sur les CFM, sont faciles à utiliser et

largement suffisants pour ce type d'analyse. Néanmoins, l'utilisation du CFM en milieu de travail impose des précautions à l'échelon individuel. Même en cas de conditions de travail identiques, les résultats d'un salarié ne sont pas représentatifs de l'astreinte de l'ensemble d'un groupe de salariés. De plus, les résultats du CFM ne doivent pas être interprétés en termes de capacités individuelles. Pour évaluer une contrainte thermique, l'enregistrement de FC doit se faire sur tous les salariés qui acceptent la mesure, si la situation de travail occupe moins de 5 salariés. Si le nombre de salariés exposés est plus important, les recueils doivent être plus nombreux et les participants doivent alors être tirés au sort.

Des mesures par CFM peuvent présenter des aléas qui doivent être envisagés lors de la décision initiale de recueil des FC. Ainsi, la mise en place du CFM doit pouvoir se faire dans un local calme proche du poste de travail pour expliquer les principes et objectifs de la mesure, ses conséquences pratiques et l'utilisation de ses résultats. De plus, le salarié porteur du CFM devra appliquer quelques règles simples : faire son travail comme d'habitude, prendre de temps en temps des pauses (assis au calme sans discuter avec les collègues), ne pas regarder la montre qui affiche les données de FC car ceci pourrait le troubler inutilement. Durant les recueils de la présente étude, la montre est dans un vêtement ou son écran est recouvert. Enfin, l'enregistrement peut, pour diverses raisons, être inexploitable ; mais ceci est de plus en plus rare avec les appareils modernes qui enregistrent les données directement dans la ceinture, ce qui limite le parasitage des signaux et supprime la montre.

Il est recommandé d'équiper le salarié dès sa prise de poste afin de pouvoir déterminer une FCo après qu'il se soit habitué à l'appareillage et qu'il ait pu prendre plusieurs périodes de repos. Dans tous les cas, il faudra lui demander de rester au repos assis au moins 5 minutes avant l'exposition afin de déterminer la FCo adaptée. À l'arrêt du travail à la chaleur, un intervalle de temps entre la fin de l'exposition et le début du repos peut être de 1 minute sans pour autant perturber les résultats. Cette durée permet au salarié d'aller tranquillement s'installer assis, dans un endroit calme et thermiquement neutre. Enfin, les fréquences cardiaques avant (FCo) et après l'exposition (FCr) doivent être recueillies dans les mêmes conditions d'habillement. Lors d'un travail en tenue étanche, il est préférable d'effectuer les mesures de récupération en gardant la tenue. En effet, le déshabillage rapide demande un effort physique et induit une évaporation brutale et importante, qui tous deux retardent la stabilisation physiologique nécessaire à une bonne récupération et un bon comptage des EPCT.

**CONCLUSION**

Lors d'expositions à des contraintes thermiques élevées ou brèves ou réalisées en combinaisons de protection (étanches, aluminisées...), les outils habituels d'évaluation de l'astreinte thermique sont inadaptés. Les résultats de cette étude montrent que les EPCT rendent compte avec précision de l'astreinte thermique en général et particulièrement dans les conditions dans lesquelles les outils habituels sont inadaptés et dangereux. Le résultat

tat des EPCT permet de décider de la limitation de l'exposition à la chaleur. La variété des situations de travail, le grand nombre de salariés qui ont participé à cette étude et la concordance des résultats à des données recueillies en situation de laboratoire valident la pertinence de la limite proposée de 20 bpm d'EPCT. Cette limite assure que l'astreinte thermique sera tou-

jours inférieure à la valeur seuil de 1 °C en-deçà de laquelle le risque d'hyperthermie est négligeable. Les EPCT permettent de contrôler les astreintes physiques et thermiques subies par les salariés et d'organiser la mise en place de pauses. Lorsque les durées d'exposition sont supérieures à 1 heure, la perte sudorale sera mesurée afin de ne pas négliger le risque de déshydratation.

## POINTS À RETENIR

- Au travail, les contraintes thermiques se caractérisent par des niveaux élevés et des durées courtes.
- Les indices actuels d'astreinte thermique sont peu précis dans les conditions actuelles de travail à la chaleur.
- Les EPCT sont faciles à mesurer et sont un bon indicateur de l'astreinte thermique.
- Des EPCT inférieures à 20 bpm assurent une astreinte thermique acceptable.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 | ARNAUDO B, MAGAUD-CAMUS I, SANDRET N, COUTROT T ET AL. - L'exposition aux risques et aux pénibilités du travail de 1994 à 2003. Premiers résultats de l'enquête SUMER 2003. *Prem Inf. Prem Synth.* 2004 ; 52.1 : 1-8.
- 2 | Fourth European Working Conditions Survey European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2007 ([www.eurofound.europa.eu/pubdocs/2006/98/en/2/efo698en.pdf](http://www.eurofound.europa.eu/pubdocs/2006/98/en/2/efo698en.pdf)).
- 3 | HAMONT-CHOLET S, SANDRET N - Accidents et conditions de travail. *Prem Inf. Prem Synth.* 2007 ; 31.2 : 1-7.
- 4 | MEYER JP, RAPP R - Survey of heat stress in industry. *Ergonomics.* 1995 ; 38 (1) : 36-46.
- 5 | MALCHAIRE J - Travail à la chaleur. Encyclopédie médico-chirurgicale. Pathologie professionnelle et de l'environnement 16-782-A-10. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson ; 2014 : 9 p.
- 6 | LEE JK, NIO AQ, LIM CL, TEO EY ET AL. - Thermoregulation, pacing and fluid balance during mass participation distance running in a warm and humid environment. *Eur J Appl Physiol.* 2010 ; 109 (5) : 887-98.
- 7 | MORA-RODRIGUEZ R, DEL COSO J, HAMOUTI N, ESTEVEZ E ET AL. - Aerobically trained individuals have greater increases in rectal temperature than untrained ones during exercise in the heat at similar relative intensities. *Eur J Appl Physiol.* 2010 ; 109 (5) : 973-81.
- 8 | VOGT JJ, METZ B - Ambiances thermiques. In: Scherrer J - Précis de physiologie du travail, Notions d'ergonomie. Paris : Masson ; 1981 : 217-263, 585 p.
- 9 | MAIRIAUX P, MALCHAIRE J - Le travail en ambiance chaude. Principes, méthodes, mise en oeuvre. Collection de monographies de médecine du travail 7. Paris : Masson ; 1990 : 172 p.
- 10 | RAMSEY JD, BURFORD CL, BESHIR MY, JENSEN RC - Effects of workplace thermal conditions on safe work behavior. *J Safety Res.* 1983 ; 14 (3) : 105-14.
- 11 | GONZÁLEZ-ALONSO J, TELLER C, ANDERSEN SL, JENSEN FB ET AL. - Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol.* 1999 ; 86 (3) : 1032-39.
- 12 | JAY O, KENNY GP - Heat exposure in the Canadian workplace. *Am J Ind Med.* 2010 ; 53 (8) : 842-53.
- 13 | KRAFT JA, GREEN JM, BISHOP PA, RICHARDSON MT ET AL. - Impact of dehydration on a full body resistance exercise protocol. *Eur J Appl Physiol.* 2010 ; 109 (2) : 259-67.
- 14 | Problèmes de santé associés au travail dans des conditions de contrainte thermique. Rapport technique n° 412. OMS, 1969 (<http://apps.who.int/iris/handle/10665/37960>).
- 15 | WYNDHAM CH, HEYNS AJ - The probability of heat stroke developing at different levels of heat stress. *Arch Sci Physiol.* 1973 ; 27 (4) : 545-62.
- 16 | MALCHAIRE J, KAMPMANN B, HAVENITH G, MEHNERT P ET AL. - Criteria for estimating acceptable exposure times in hot working environments: a review. *Int Arch Occup Environ Health.* 2000 ; 73 (4) : 215-20.
- 17 | Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques. Norme française homologuée NF EN ISO 9886. Juillet 2004. Indice de classement X 35-207. Saint-Denis la Plaine : AFNOR ; 2004 : 24 p.
- 18 | KRANING KK 2ND, GONZALEZ RR - Physiological consequences of intermittent exercise during compensable and uncompensable heat stress. *J Appl Physiol.* 1991 ; 71 (6) : 2138-45.
- 19 | Ergonomie des ambiances thermiques. Stratégie d'évaluation du risque pour la prévention de contraintes ou d'inconfort dans des conditions de travail thermiques. Norme française homologuée NF EN ISO 15265. Décembre 2004. Indice de classement X 35-216. Saint-Denis la Plaine : AFNOR ; 2004 : 18 p.
- 20 | MORAN D, SHITZER A, PANDOLF KB - A physiological strain index to evaluate heat stress. *Am J Physiol.* 1998 ; 275 (1Pt2) : R129-R134.
- 21 | TIKUISIS P, McLELLAN TM, SELKIRK G - Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Med Sci Sports Exerc.* 2002 ; 34 (9) : 1454-61.

**Évaluation des astreintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les expirations cardiaques thermiques (EPCT)**

- 22 | MORAN DS - Stress evaluation by the physiological strain index (PSI). *J Basic Clin Physiol Pharmacol*. 2000 ; 11 (4) : 403-23.
- 23 | VOGT JJ, FOEHR R, KIRSCH J, GOLLE F ET AL. - Estimation des charges de travail et des charges de chaleur en situation réelle de travail : principes et applications d'une nouvelle méthodologie. *Trav Hum*. 1970 ; 33 (1-2) : 125-40.
- 24 | BROUHA L - Physiologie et industrie. Monographies de physiologie causale. Paris : Gauthier-Villars ; 1963 : 181 p.
- 25 | MORAN D, EPSTEIN Y, LAOR A, VITALIS A ET AL. - Predicting heart rate response to various metabolic rates, environments and clothing. *J Appl Physiol*. 1995 ; 78 (1) : 318-22.
- 26 | KILGOUR RD, MANSI JA, WILLIAMS PA - Cardiodynamic responses during seated and supine recovery from supramaximal exercise. *Can J Appl Physiol*. 1995 ; 20 (1) : 52-64.
- 27 | MAEDER MT, AMMANN P, RICKLI H, BRUNNER-LA ROCCA HP - Impact of the exercise mode on heart rate recovery after maximal exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2009 ; 105 (2) : 247-55.
- 28 | DIMKPA U, OJI JO - Association of heart rate recovery after exercise with indices of obesity in healthy, non obese adults. *Eur J Appl Physiol*. 2010 ; 108 (4) : 695-99.
- 29 | BORRESEN J, LAMBERT MI - Autonomic control of Heart Rate during and after Exercise. Measurement and Implications for Monitoring Training status. *Sports Med*. 2008 ; 38 (8) : 633-46.
- 30 | DESSUREAULT PC, TELLIER A. - L'autosurveillance de l'astreinte thermique des jeunes travailleurs affectés à l'engrangement du foin. Rapport R-580. IRSST, 2008 ([www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-580.pdf](http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-580.pdf)).
- 31 | MEYER JP, FLENGHI D - Détermination de la dépense énergétique de travail et des capacités cardio-respiratoires maximales à l'aide d'un exercice sous-maximal sur step test. Vu du terrain TL 16. *Doc Méd Trav*. 1995 ; 64 : 245-51.
- 32 | ASTRAND PO, RODAHL K - Textbook of work physiology: Physiological basis of exercise. New-York : McGraw-Hill ; 1970 : 669 p.
- 33 | MAIRIAUX P, SAGOT JC, CANDAS V - Oral temperature as an index of core temperature during heat transients. *Eur J Appl Physiol*. 1983 ; 50 (3) : 331-41.
- 34 | Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible. Norme française homologuée NF EN ISO 7933. Février 2005. Indice de classement X 35-204. Saint-Denis la Plaine : AFNOR ; 2005 : 41 p.
- 35 | Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire. Norme française homologuée NF EN ISO 9920. Août 2009. Indice de classement X 35-206. Saint-Denis la Plaine : AFNOR ; 2009 : 121 p.
- 36 | NIELSEN R, MEYER JP - Evaluation of metabolism from heart rate in industrial work. *Ergonomics*. 1987 ; 30 (3) : 563-72.
- 37 | D'AMBROSIO ALFANO FR, PALELLA BI, RICCIO G - Thermal environment assessment reliability using temperature - humidity indices. *Ind Health*. 2011 ; 49 (1) : 95-106.
- 38 | JEZOVÁ D, KVETNANSKY R, VIGAS M - Sex differences in endocrine response to hyperthermia in sauna. *Acta Physiol Scand*. 1994 ; 150 (3) : 293-98.
- 39 | BRAZAITIS M, SKURVYDAS A - Heat acclimation does not reduce the impact of hyperthermia on central fatigue. *Eur J Appl Physiol*. 2010 ; 109 (4) : 771-78.
- 40 | PIRNAY F, PETIT JM, DEROANNE R - Évolution comparée de la fréquence cardiaque et de la température corporelle pendant l'exercice musculaire à haute température. *Int Z Angew Physiol*. 1969 ; 28 (1) : 23-30.
- 41 | KAMON E, BELDING HS - Heart rate and rectal temperature relationships during work in hot humid environments. *J Appl Physiol*. 1971 ; 31 (3) : 472-77.
- 42 | GIVONI B, GOLDMAN RF - Predicting heart rate response to work, environment, and clothing. *J Appl Physiol*. 1973 ; 34 (2) : 201-04.
- 43 | BOISVERT P, NAKAMURA K, SHIMAI S, CANDAS V ET AL. - Sweat rate and body temperature during exercise in dry and humid environments. In: Nielsen V, Jorgensen D (Eds.) - Advances in industrial ergonomics and safety. Volume IV. London : Taylor & Francis ; 1993 : 399-404, 786 p.
- 44 | KUKKONEN-HARJULA K, OJA P, LAUSTIOLA K, VUORI I ET AL. - Haemodynamic and hormonal responses to heat exposure in a Finnish sauna bath. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1989 ; 58 (5) : 543-50.
- 45 | HASAN J, KARVONEN M, PIRONEN P - Special review. II. Physiological effects of extreme heat. As studied in the Finnish « sauna » bath. *Am J Phys Med*. 1967 ; 46 (2) : 1226-46.
- 46 | NOAKES TD, MYBURGH KH, DU PLESSIS J, LANG L ET AL. - Metabolic rate, not percent dehydration, predicts rectal temperature in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1991 ; 23 (4) : 443-49.
- 47 | PANDOLF KB - Effects of physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance: recent observations. *Med Sci Sports*. 1979 ; 11 (1) : 60-65
- 48 | EPSTEIN Y, MORAN DS, SHAPIRO Y, SOHAR E ET AL. - Exertional heat stroke: a case series. *Med Sci Sports Exerc*. 1999 ; 31 (2) : 224-28.