

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

Cas particulier du port de combinaisons étanches

EN
RÉSUMÉ

AUTEURS :

E. Turpin-Legendre, J.P. Meyer, Laboratoire de physiologie du travail, département Homme au travail, INRS

Cet article rappelle succinctement dans une première partie les principes de l'adaptation de l'Homme à la chaleur et les risques qui découlent de ces expositions en insistant sur les aspects relatifs au port de combinaisons étanches. Dans un second temps, sont rapportées deux études ayant comparé des combinaisons étanches ventilées et non ventilées en situation réelle de travail et en laboratoire. Des métrologies simples, telles que le recueil de la fréquence cardiaque (FC) en continu et des évaluations subjectives ont été utilisées. Leur complémentarité permet de définir des environnements de travail sûrs et acceptables quand les indices d'astreinte normalisés ne peuvent être utilisés.

MOTS CLÉS

Astreinte thermique / travail à la chaleur / équipement de protection individuelle / EPI.



a



b

↓ Figure 1

Tenue Tyvek® (a) et tenue ventilée Mururoa® (b) avec les équipements complémentaires (appareil de protection respiratoire, bottes, gants) portés par les salariés et les sujets de laboratoire.

Malgré l'amélioration des conditions de travail, de nombreux salariés restent encore soumis à des contraintes thermiques élevées, même si celles-ci sont le plus souvent brèves. Les

résultats de l'enquête SUMER 2003 [1] montrent que plus de 20 % des salariés sont exposés à des nuisances thermiques. Ces contraintes sont assez bien connues lorsque la source de chaleur est directement

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

liée au travail (verrière, sidérurgie, papeterie...) mais les contraintes climatiques restent difficiles à contrôler. Par ailleurs, les opérations d'entretien, qu'elles soient planifiées ou non, sont caractéristiques d'expositions brèves dans lesquelles la composante thermique est peu prise en compte, sinon ignorée. Ces interventions peuvent induire des niveaux d'activité physique importants, producteurs de chaleur endogène dont l'élimination, si elle est empêchée, provoque des élévations excessives des températures corporelles [2]. Des organisations de travail plus fractionnées (expositions espacées, rares, rotations rapides de poste, intérim, journées de récupérations regroupées...), l'appel à la sous-traitance, peuvent causer d'importantes difficultés pour le maintien d'un niveau d'acclimatement adapté. Enfin, l'inconfort thermique est, pour ce qui concerne les nuisances thermiques, la plainte la plus fréquente des salariés. Sans répercussion directe sur leur santé, c'est un élément important pour leur satisfaction et leur productivité au travail.

S'ajoute à ces difficultés la multiplication de l'utilisation de vêtements de protection de tous types, plus ou moins étanches, comme dans le nucléaire, la chimie, les sites de désamiantage, l'agroalimentaire, l'agriculture, l'électronique [3 à 9]. Ce développement est lié à des exigences de propreté et/ou à des situations de travail particulières dans lesquelles le salarié doit se protéger de produits toxiques ou, à l'inverse, le processus de travail doit être protégé de la « pollution » apportée par le salarié (humidité, agents infectieux...). Ces combinaisons peuvent créer ou accroître des risques thermiques, l'inconfort des

salariés et imposer des contraintes cardiorespiratoires à risque. De nombreuses études ont montré les effets physiologiques délétères du port de combinaisons étanches même dans un environnement « thermique neutre » [10, 11]. En environnement tempéré, des études menées sur différents types de combinaisons étanches montrent de faibles variations des astreintes physiologiques et subjectives entre ces combinaisons [12 à 15]. Les deux principales causes d'aggravation des astreintes sont le poids de l'équipement à porter [15 à 17] et le fait que l'évaporation de la sudation, source essentielle de dissipation de chaleur, soit limitée ou bloquée [18]. Cette limitation a pour conséquence un stockage de chaleur et accessoirement une mouillure cutanée très inconfortable. Les combinaisons ventilées, perçues comme une solution à ces difficultés, nécessitent un débit d'air important, techniquement difficile à réaliser. Si le débit est trop faible, la combinaison perd ces avantages et, de plus, expose le porteur à respirer un air appauvri en oxygène [19].

Dans une première partie, cet article rappelle succinctement les connaissances sur les contraintes thermiques en relation avec le port de vêtements étanches. Puis sont présentés les résultats de deux études sur le travail [20, 21] en combinaisons étanches pour répondre aux questions que soulèvent ces protections.

EXPOSITION À LA CHALEUR

ADAPTATIONS PHYSIOLOGIQUES

L'homme est un homéotherme qui doit maintenir sa tempéra-

ture centrale constante autour de 37° C. Cette stabilité nécessite un équilibre entre sources (métabolisme de base, travail physique et contrainte thermique) et pertes (convectives et évaporatoires au niveau de la peau et des voies respiratoires) de chaleur. La température au niveau des organes du tronc et de la tête varie peu alors que celle de la peau ou des muscles périphériques peut varier de plusieurs degrés en fonction de l'environnement ou des efforts physiques. La température corporelle (T) est la somme pondérée de la température centrale (Tc) représentative du noyau et de la température moyenne de la peau (Tp) selon la relation $T = 0,1 T_p + 0,9 T_c$ [22]. La Tp est calculée à partir de températures locales de la peau [23]. La température rectale est considérée comme la Tc la plus représentative mais d'autres localisations sont plus faciles d'accès telle la température sublinguale, la plus utilisée en situation de travail [23 à 25].

L'évaporation de la sudation à la surface de la peau est le moyen le plus efficace d'éliminer la chaleur. En général, la peau n'est pas recouverte de sueur sur toute sa surface. La mouillure cutanée, rapport de la surface corporelle mouillée à la surface corporelle totale, joue un rôle important dans l'efficacité de l'évaporation. Si l'air est sec, la mouillure est inférieure à 50 %, l'évaporation de la sueur est favorisée et son ruissellement est très faible. Cette situation permet le maintien de l'équilibre thermique et une impression de confort mais n'écarte pas le risque de déshydratation. C'est, en théorie, la situation en combinaison étanche ventilée. A l'inverse, si l'air est très humide, l'évaporation sera difficile, la sudation et la mouillure cutanée augmentent et l'équilibre

thermique ne peut plus être maintenu. Le rendement évaporatoire de la sudation va diminuer et une partie importante de la sueur va ruisseler sans dissiper de chaleur [26]. C'est une situation très désagréable avec un risque d'hyperthermie marqué. C'est, en théorie, la situation d'un vêtement étanche non ventilé, dans une ambiance chaude. En ambiance neutre, des phénomènes de conduction thermique au travers de ces vêtements peuvent permettre de contrôler les astreintes [27]. En ambiance fraîche ou froide, les combinaisons étanches augmentent même les pertes de chaleur et le risque d'hypothermie [10].

La thermorégulation est soumise à de nombreux facteurs individuels ou environnementaux. L'acclimatement à la chaleur, obtenu généralement en 9 à 12 jours d'exposition, augmente les capacités sudorales en volume et en efficacité évaporatoire et comme il se refroidit mieux, le sujet acclimaté a des températures corporelles plus basses et une plus grande plage d'adaptation cardiovasculaire. De plus, il perd peu de sels minéraux par la sueur. Cependant, l'acclimatement est labile. Quelques jours sans exposition suffisent à réduire de moitié les capacités sudorales et quelques semaines à les faire disparaître [2] ; ce qui peut poser problème lors de périodes de vacances ou dans des tâches intermittentes dans lesquelles des protections sont nécessaires comme l'entretien dans le nucléaire, les chantiers de désamiantage ou certains systèmes de rotations de poste. De même, on ne s'acclimatait qu'aux niveaux de contraintes auxquels on est exposé. Ainsi, même acclimaté à une contrainte, un salarié risque de ne pas être prêt à une exposition plus chaude. Les caractéristiques individuelles telles que l'obésité, la mai-

greur, la consommation d'alcool, la prise de médicaments (actions sur les mécanismes de la thermorégulation et/ou comportement inadapté) altèrent également les adaptations à la chaleur [22, 28, 29] tout en sachant que les capacités sudorales diminuent avec l'âge.

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique et requiert trois conditions [29] :

- un bilan thermique équilibré,
- une mouillure cutanée faible,
- une température cutanée moyenne située dans les limites du confort (32 à 34 °C).

L'inconfort thermique entraîne une gêne sans présenter un risque pour la santé. En général, un vêtement étanche non ventilé empêche au moins une de ces 3 conditions. Les zones de confort varient fortement entre les zones géographiques, les individus et leur acclimatement. La température de confort est surtout influencée par l'intensité de l'activité physique. Ainsi, si elle est comprise entre 20 et 24 °C en hiver et 23 et 26 °C en été [30] pour un travail sédentaire, elle sera de 12 à 13 °C pour une activité physique intense [31]. Le pourcentage d'humidité relative doit être compris entre 40 et 60 %.

RISQUES LIÉS AU TRAVAIL À LA CHALEUR

La connaissance des pathologies liées à la chaleur est particulièrement utile dans un environnement qui exige le port d'une combinaison étanche. En effet, ces protections peuvent cacher les signaux d'alerte ou transformer des paramètres de l'ambiance qui semblent sans risque en situation à risque [15, 18]. Si la prévention n'est pas efficace, il est important de connaître les premiers signes cliniques car ils peuvent être les

premiers et seuls avertissements du dépassement des limites.

L'exposition à la chaleur peut conduire à des pathologies du fait, soit de la mise en jeu trop importante des mécanismes de thermorégulation, soit du dépassement de leurs capacités. Une sudation abondante et prolongée peut provoquer une déshydratation, un déficit ionique ou un épuisement thermique [28]. Le déficit ionique est responsable de crampes de chaleur. L'épuisement thermique correspond à un début de coup de chaleur, sous forme de syncope de chaleur avec perte de connaissance soudaine et brève à cause de la mise en jeu excessive de la vasodilatation périphérique avec hypotension artérielle et insuffisance transitoire du débit sanguin cérébral. Le coup de chaleur peut débuter par des modifications du comportement (inattention, lenteur de compréhension ou de mouvement...). En situation de travail, ces signes doivent attirer l'attention des collègues de travail afin d'interrompre l'exposition et de retirer au plus vite la combinaison. Le coup de chaleur est la conséquence de l'arrêt de la sudation car, en cas de déshydratation importante, priorité est donnée aux fonctions vitales en particulier circulatoire. Il peut survenir lors de toute exposition à une contrainte thermique sévère ou chez une personne qui porte longtemps une tenue étanche, même si la situation ne paraît pas particulièrement chaude. Le coup de chaleur est la conséquence de la décompensation de la thermorégulation. Il reste rare mais de pronostic grave puisque la mortalité est de 15 à 25 % des cas [32, 33]. Classiquement, il comporte trois signes caractéristiques :

- une peau chaude et sèche suite à l'arrêt de la sudation, signe caché par la combinaison,

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

- une température centrale supérieure à 40 °C qui augmente inexorablement en absence de traitement,
- des signes neurologiques sévères avec convulsions, coma, délire, agitation, propos incohérents.

La probabilité de survie et de guérison sans séquelle dépend de la précocité du traitement qui consiste à refroidir la personne le plus rapidement possible, jusqu'à l'immerger dans de l'eau froide à 10 °C [33].

Lors d'expositions prolongées (supérieures à une heure), le risque de déshydratation doit être contrôlé, en particulier dans le cas de port de tenues ventilées qui autorisent des niveaux évaporatoires importants sans inconfort majeur. La production horaire de sueur peut atteindre 2 litres par heure chez un sujet acclimaté à la chaleur et physiquement très entraîné [2, 22, 29]. Une perte de masse corporelle de 1 à 2 %, correspondant à moins de 1 litre de sueur, est un déficit hydrique minime mais perceptible sur une variété de performances [26]. Une réduction de 2 % du poids du corps entraîne une baisse des capacités de travail d'environ 20 % [34]. Pour Kraft et al. [35], à partir d'une déshydratation de 3 %, apparaissent des difficultés de récupération, de perception de l'effort et une baisse de performance. L'accident de déshydratation peut survenir si la perte atteint 5 % du poids du corps [22, 29]. La norme ISO 7933 fixe une perte hydrique maximale à 5 % de la masse corporelle lorsque les salariés ont des boissons à disposition et à 3 % sans réhydratation [36]. Enfin, et ce n'est de loin pas la moindre des gênes, les combinaisons étanches retiennent la sueur. Ainsi, le salarié, en plus d'une situation très inconfortable, risque de souffrir d'at-

teintes cutanées favorisées par la macération (irritation, mycoses...). Des altérations fonctionnelles telles que les modifications de la préhension à cause de la sueur ou des effets psychologiques sont également décrits. De nombreuses études, dont les résultats sont parfois contradictoires, ont mis en évidence l'augmentation du temps de réponse ainsi que des erreurs ou des omissions dans des tâches cognitives sous contrainte thermique [29, 37 à 39]. Le port de combinaisons étanches serait même responsable d'une augmentation significative des contraintes musculaires lors de gestes répétitifs et d'une imprécision plus grande de ceux-ci [11]. En conséquence, dans ces situations qui induisent une baisse de l'attention et des capacités fonctionnelles, le risque d'accident est augmenté [22, 29, 31, 38].

INDICES DE CONTRAINTE ET D'ASTREINTE THERMIQUE

Les indices de contrainte déterminent, à partir de données physiques de l'ambiance, le niveau d'astreinte subi par une personne exposée. Les indices d'astreinte sont des données physiologiques ou subjectives qui renseignent sur la pénibilité de l'exposition subie par la personne exposée. L'ensemble de ces indices permettent de savoir si une situation de travail peut-être considérée à risque pour le salarié.

➤ INDICES DE CONTRAINTE

Le plus utilisé est le *Wet Bulb Globe Temperature* ou indice de température au thermomètre-globe mouillé (WBGT) [40] calculé à partir de la température du globe noir (tg), la température humide naturelle (thn) et la température de l'air (ta) selon la relation $WBGT = 0,7 \text{ thn} + 0,2 \text{ tg} + 0,1 \text{ ta}$ hors bâtiment. En intérieur, la

relation devient $WBGT = 0,7 \text{ thn} + 0,3 \text{ tg}$. Le WBGT permet de déterminer si le salarié dépasse des limites de contrainte acceptable et fixe des cycles travail-repos pour rester en-deçà de ces limites. Son application peut être extrapolée aux tenues étanches sous réserve de correction qui sont arbitrairement une diminution de 5 °C des limites lorsque le salarié porte un vêtement de protection étanche [22] voire de 10 °C selon la perméabilité de la combinaison pour une tenue complètement étanche [14]. Cependant, le WBGT ne s'applique pas pour des contraintes thermiques de courtes durées et ne permet pas de déterminer sur quel paramètre agir pour limiter la contrainte. Si le WBGT est supérieur à 25 °C, une analyse plus détaillée d'une situation doit être réalisée avec d'autres indicateurs [41].

➤ INDICES D'ASTREINTE

L'indice d'astreinte thermique prévisible [36] est une évolution de l'indice de sudation requise. Il évalue et interprète l'astreinte à partir de la contrainte thermique, des estimations du métabolisme énergétique et des caractéristiques thermiques de la tenue vestimentaire. Il prédit le débit sudoral, la température corporelle puis, à partir de ces 2 grandeurs, calcule des durées limites d'exposition. Il n'est pas applicable aux situations de travail en combinaison étanche. Son intérêt réside dans la mise en évidence des paramètres les plus influents de l'astreinte et permet de cibler les actions spécifiques de prévention.

Trois grandeurs physiologiques permettent d'évaluer l'astreinte thermique chez le salarié : la fréquence cardiaque (FC) en battement par minute (bpm), la sudation et la température centrale

[23]. Ces indices, de maniement simple, peuvent être utilisés dans des situations de contraintes thermiques brèves et lors du port de vêtements de protection. La température cutanée n'évalue pas l'astreinte, c'est un indicateur de confort thermique. La notion d'inconfort est importante et doit être entendue car c'est un élément d'alerte d'une situation à risque thermique qui doit s'accompagner de la mise en œuvre d'une démarche de prévention.

Au cours du travail, la FC s'élève du fait de la dépense énergétique (composante énergétique) et du besoin accru de transport de chaleur du noyau vers la périphérie (composante thermique). Pendant la phase de récupération, la composante énergétique retrouve rapidement son niveau initial (< 2 minutes) alors que la composante thermique a une récupération plus lente. Elle est appelée *Extra Pulsation Cardiaque Thermique* (EPCT) et est calculée par la différence entre la moyenne des FC des 3^e, 4^e, 5^e minutes de récupération et la FC de repos avant le travail [31]. En moyenne, la valeur seuil d'EPCT à ne pas dépasser est 30 bpm [23]. Le contrôle de la perte sudorale reste nécessaire lors d'expositions longues à la chaleur (> 1 h). Des pesées successives sur une balance de précision (+/- 50 g) permettent une quantification satisfaisante des pertes sudorales connaissant les valeurs limites préconisées de 5 % (avec possibilité de boire) et de 3 % (sans boire) de perte de la masse corporelle [36].

La mesure de la température centrale reflète l'astreinte thermostatique. La norme NF EN ISO 9886 propose cinq sites pour mesurer la température centrale (Tc) parmi lesquels le plus simple est la température buccale [23, 25]. Une élévation de 1 °C de la Tc entre la fin et

le début d'un travail est la valeur limite admissible d'astreinte thermostatique. Un indice associant la mesure de la Tc par voie rectale et de la FC a été développé par Moran [42] pour répondre aux situations en vêtement étanche. Cependant ce modèle est peu utilisé en milieu de travail car il nécessite la prise de température rectale délicate à mettre en œuvre dans ces conditions.

En complément des données mesurées, des échelles de jugements subjectifs de la situation de travail sont utilisées pour quantifier le confort ou les astreintes thermiques [43]. Elles permettent d'évaluer une astreinte globale perçue par des salariés dans des conditions chaudes auxquelles s'additionnent souvent des charges physiques élevées et un environnement stressant [18].

ÉTUDES RELATIVES AU PORT DE COMBINAISONS ÉTANCHES

Trois études ont été menées en situation réelle de défilage de l'amiante. Rissanen et al. [44] décrivent principalement les variations de fréquence cardiaque liées à la charge physique de travail et les risques d'astreinte thermique excessive. Meyer [45] analyse les astreintes physiologiques et subjectives lors d'opération de retrait d'amiante et propose des durées limites d'exposition (DLE). Enfin, Turpin-Legendre et al. [20, 21] ont entrepris une étude de terrain complétée par une expérimentation en laboratoire afin d'argumenter le choix entre une combinaison étanche jetable avec appareil de protection respiratoire et une combinaison étanche ven-

tilée. L'objectif est de mettre en évidence des différences physiologiques et subjectives entre les deux tenues dans une situation de travail prolongée et dans 2 tâches brèves réalisées en laboratoire avec une forte charge physique, afin de pouvoir faire des recommandations de port en fonction du site de travail. Les résultats de cette dernière étude sont synthétisés dans cet article.

SUJETS ET VÊTEMENTS UTILISÉS

En situation de travail, 11 salariés d'une entreprise spécialisée dans le désamiantage, dont l'ancienneté dépassait deux mois, se sont portés volontaires. Ils avaient un âge moyen de 30 (± 6) ans, mesuraient 1,78 (± 0,07) m, pesaient 77 (± 14) kg, avaient un indice de masse corporelle de 23,5 (± 3,7) kg.m⁻² et une capacité cardiorespiratoire maximale (VO₂ max) calculée de 45,1 (± 9,3) ml.kg⁻¹.min⁻¹.

Au laboratoire, l'étude, axée sur deux tâches à composante physique, a été réalisée par 15 étudiants sportifs. Ils avaient en moyenne 23 (± 2) ans, mesuraient 1,80 (± 0,05) m, pesaient 75 (± 7) kg, avaient un indice de masse corporelle de 23,3 (± 2,3) kg.m⁻² et une VO₂ max calculée de 48,6 (± 8,1) ml.kg⁻¹.min⁻¹.

Dans les 2 études, la VO₂ max a été calculée à partir d'un test d'effort sous maximal sur step-test, en tenue de sport [46].

Deux combinaisons étanches Tyvek® (Tyv) et Mururoa® (Mur) ont été comparées en situation de travail et au laboratoire. Dans ce dernier, une 3^e tenue légère (Spo), dite de référence (chaussures de sport, short et polo), a été portée par les sujets. La tenue Tyv (cf. figure 1.a, p. 19) pesait entre 0,15 et 0,20 kg et comprenait une combinaison imperméable à usage unique avec capuche (Tyvek-Pro.Tech® type 5).

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

Elle était portée avec des sous-vêtements en coton-polyester et un appareil de protection respiratoire à adduction d'air. Ce dernier, les gants et les bottes étaient solidarisés à la combinaison par du ruban adhésif. La tenue Mur (cf. figure 1.b, page 19) pesait 1,80 kg. Il s'agissait d'une combinaison étanche ventilée intégrant des bottes, des gants et un heaume. Celui-ci étant solidaire de la combinaison, le sujet ne portait pas d'appareil de protection respiratoire ; de l'air ambiant comprimé et filtré était envoyé dans la combinaison à un débit de 700 L.min⁻¹.

DESCRIPTION DES ACTIVITÉS AU TRAVAIL ET DES TÂCHES EXPÉRIMENTALES

Le travail de désamiantage en entreprise a été réalisé en situation habituelle dans un espace confiné par des films plastique comme l'exige la réglementation française. L'activité des 11 salariés consistait à brosser l'amiante des plafonds et des murs. Ils travaillaient principalement debout, soit au sol, soit sur un échafaudage, les

bras assez souvent au-dessus des épaules. Ils ont réalisé le même travail en portant les 2 combinaisons dans un ordre tiré au sort. La durée légale de travail est de 2 h 30 mais la durée réelle variait entre 1 heure et 2 h 30 car ils avaient la possibilité de quitter le site lorsque la situation devenait trop pénible.

Au laboratoire, 2 tâches ont été réalisées : une tâche normalisée T_N [47] et un parcours sur échafaudage et échelle T_E . Les deux tâches ont été réalisées dans un ordre aléatoire. Elles sont schématisées dans la figure 2. La tâche T_N consistait à monter et descendre un contrepoids pesant 20 kg à l'aide d'un câble passant dans 2 poulies puis relié à une poignée placée devant le sujet. Le trajet de la poignée manipulée par le sujet allait de la hauteur de sa tête à celle de ses genoux sur une distance fixée de 1,5 m. T_N était réalisée pendant 6 minutes à une fréquence de 12 fois par minute. La tâche T_E simulait les contraintes dues à un espace confiné et difficile d'accès. Le sujet montait et descendait un écha-

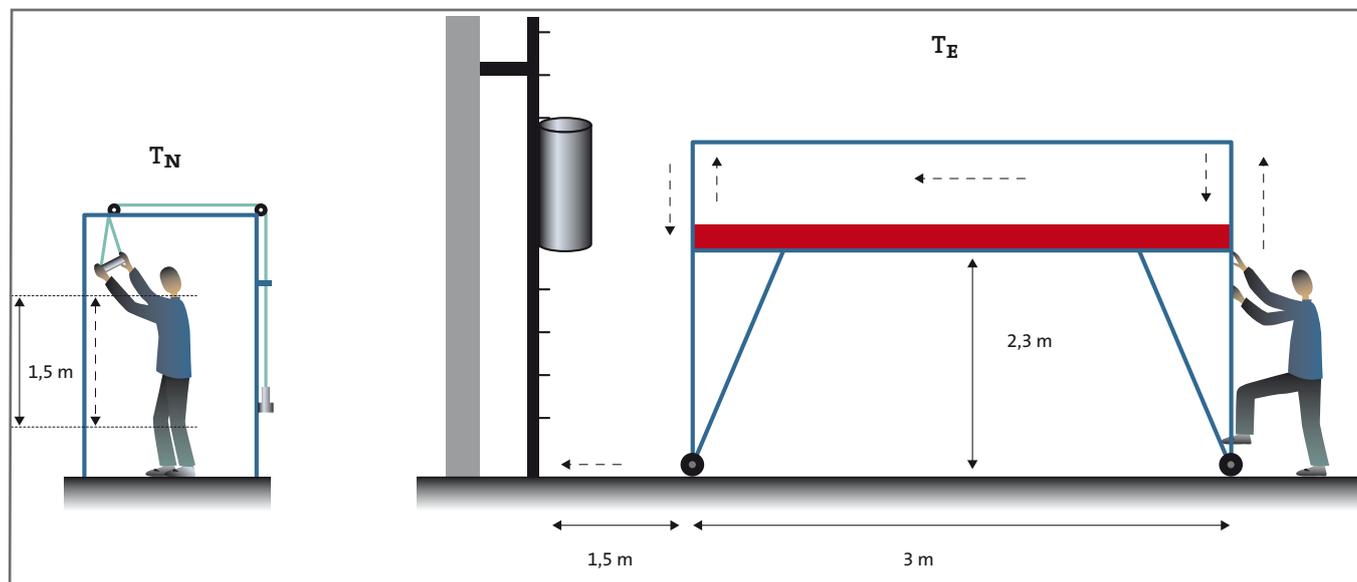
faudage et une échelle à crinoline. Ce circuit réalisé en 1 minute était répété 6 fois soit une durée totale de 6 minutes. Entre les 2 tâches, les sujets disposaient au minimum de 15 minutes de repos en situation de confort thermique.

RECUEIL DES DONNÉES

La température de l'air et l'humidité relative ont été mesurées dans les 2 séries expérimentales. En entreprise, la dépense énergétique au cours du travail a été estimée par observation [48]. La mesure de la température centrale du corps, relevée par l'enregistrement de la température sublinguale (T_{or}) [23, 24], a été mesurée au repos/assis pendant 5 minutes, dans un environnement « neutre », avant et immédiatement après l'exposition en entreprise. La différence entre ces 2 valeurs donne la variation de la température orale (dT_{or}). Pour les 2 études, la FC, exprimée en bpm, a été enregistrée en continu par télémétrie pendant les phases de repos (FCr) de 5 minutes avant et après le travail et pendant le travail (FCt). La charge

↓ Figure 2

Représentation schématique des deux tâches. T_N est la tâche normalisée et T_E la tâche Échafaudage + échelle. Les flèches en pointillés représentent le trajet effectué par la masse (en T_N) et par le sujet (en T_E).



physique de travail est déterminée par le coût cardiaque absolu (CCA en bpm) qui est la différence FCt - FCr. Les EPCT sont calculées par la différence des FCr avant et après exposition [25, 31].

La perte de sueur a été déterminée par la différence de poids, sujets en tenue légère, avant et après exposition.

En situation de travail comme au laboratoire, une évaluation subjective de la pénibilité, exprimée en unité arbitraire (ua), a été réalisée à la fin de chaque tâche, selon deux méthodes :

- une évaluation globale à l'aide de l'échelle RPE (*rating perceived exertion*) de 1 à 20 de G. Borg [49],
- une évaluation locale à l'aide du CR10 (*category ratio scale*), échelle de 0 à 10, [49] réalisée uniquement au laboratoire, pour 7 parties du corps, main-avant-bras, bras-épaule droits et gauches, puis le cou, le bas du dos et l'ensemble des 2 membres inférieurs.

À la fin de chaque exposition, les salariés comme les sujets de laboratoire ont estimé 2 durées de réalisation de la tâche : une acceptable sans difficulté et une maximale juste avant d'être épuisé.

Pour ces 2 études, des échelles de

jugements subjectifs étaient proposées pour évaluer le confort, le rafraîchissement, la solidité, l'encombrement et les difficultés respiratoires induites par les combinaisons.

TRAITEMENT STATISTIQUE

Les données recueillies ont été analysées par des méthodes statistiques descriptives. Les résultats présentés sont les moyennes arithmétiques et leur écart-type. Les comparaisons ont été réalisées à l'aide du test t pour séries appariées de Student pour les données objectives et par un test des rangs signés pour les données subjectives. Le seuil de significativité retenu était $p < 0,05$. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel Statgraphics®.

RÉSULTATS

> MESURES PHYSIQUES

En entreprise, la température sèche de l'air était $26 (\pm 1) ^\circ\text{C}$ et l'humidité relative $43 (\pm 3) \%$. En laboratoire, elles étaient respectivement de $22 (\pm 1) ^\circ\text{C}$ et de $32 (\pm 7) \%$. La durée moyenne d'exposition était de 70 min pour les travaux de déflocage et de 6 min en situation de laboratoire.

> MESURES PHYSIOLOGIQUES

Astreinte thermique

En entreprise, la dT_{or} est significativement ($p < 0,05$) plus basse avec la tenue Mur qu'avec la tenue Tyv (tableau I).

En entreprise, les pertes sudorales sont significativement ($p < 0,002$) plus importantes avec la tenue Mur qu'avec la tenue Tyv. Ce résultat s'inverse en laboratoire où les pertes sudorales sont significativement ($p < 0,03$) plus importantes dans les 2 tâches en tenue Tyv qu'en tenue Mur. Les pertes sudorales en tenue Spo ne sont pas différentes de celles en tenue Mur. Dans tous les cas la perte sudorale est plus importante dans la tâche T_E ($p < 0,005$).

La composante thermique de la fréquence cardiaque représentée par les EPCT (tableau II) montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les combinaisons Tyv et Mur, que ce soit en entreprise ou au laboratoire. Dans les 2 situations, la valeur limite de 30 bpm d'EPCT n'est pas atteinte [23].

Astreinte cardiaque (tableau II)

En entreprise, la valeur moyenne de CCA caractérise un travail de « moyen » à « plutôt lourd » selon la

↓ Tableau I

> MOYENNES ET ÉCARTS-TYPES DES INDICES D'ASTREINTE THERMIQUE.

	Tenues	$dT_{or}^{(2)}$ en $^\circ\text{C}$	Pertes sudorales en $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$
Entreprise	Tyv	0,33 ($\pm 0,32$)	2,9 ($\pm 1,6$)
	Mur	0,16 ($\pm 0,28$)	4,6 ($\pm 2,9$)
Laboratoire T_N	Tyv	Non mesuré	11,1 ($\pm 3,9$)
	Mur/Spo ⁽¹⁾	Non mesuré	8,0 ($\pm 2,7$)
Laboratoire T_E	Tyv	Non mesuré	16,4 ($\pm 2,4$)
	Mur/Spo ⁽¹⁾	Non mesuré	11,0 ($\pm 3,4$)

(1) Les résultats pour ces deux tenues ne sont pas statistiquement différents

(2) dT_{or} : variation de la température buccale

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

Tableau II

MOYENNES ET ÉCARTS-TYPES DES INDICES D'ASTREINTE CARDIAQUE.

	Tenues	Fct en bpm ⁽²⁾	CCA en bpm ⁽³⁾	EPCT en bpm ⁽⁴⁾
Entreprise	Tyv/Mur ⁽¹⁾	116 (± 19)	35 (± 13)	5,1 (± 8,4)
Laboratoire T _N	Spo	112 (± 14)	47 (± 7)	9,3 (± 5,4)
	Tyv/Mur ⁽¹⁾	119 (± 18)	54 (± 11)	12,3 (± 9,4)
Laboratoire T _E	Spo	138 (± 13)	73 (± 10)	12,5 (± 3,6)
	Tyv/Mur ⁽¹⁾	150 (± 16)	85 (± 12)	17,3 (± 7,8)

(1) Les résultats pour ces deux tenues ne sont pas statistiquement différents
 (2) Fct : fréquence cardiaque de travail en battement par minute
 (3) CCA : coût cardiaque absolu en battement par minute
 (4) EPCT : extra-pulsations cardiaques thermiques en battement par minute

Tableau III

MOYENNES ET ÉCARTS-TYPES DU RPE ET DES DURÉES DE TRAVAIL ACCEPTABLE ET ÉPUI SANT.

	Tenues	RPE (ua*)	Durée de travail (min)	
			acceptable	avant épuisement
Entreprise	Mur	12,1 (± 1,9)	140 (± 26)	172 (± 28)
	Tyv	13,1 (± 2,5)	83 (± 45)	103 (± 49)
Laboratoire T _N	Spo	10,8 (± 2,8)	48 (± 41)	82 (± 55)
	Mur	12,5 (± 2,5)	38 (± 31)	72 (± 42)
	Tyv	12,1 (± 1,9)	35 (± 28)	66 (± 42)
Laboratoire T _E	Spo	9,4 (± 2,0)	102 (± 59)	182 (± 74)
	Mur	11,4 (± 1,3)	63 (± 42)	132 (± 59)
	Tyv	11,6 (± 2,0)	59 (± 37)	122 (± 61)

* ua : unité arbitraire

classification de Chamoux et al. [50]. En laboratoire, l'augmentation du CCA entre Spo et les tenues étanches est significative autant pour la tâche T_N (p < 0,004) que pour la tâche T_E (p < 0,001) et représente une variation, similaire dans les 2 tâches, de 14 (± 3) %. Pour un travail de 6 minutes, l'activité, illustrée par le CCA, dans la tâche T_N est considérée « modérée » à « élevée » pour Monod et al. [51] alors qu'elle est « élevée » à « très élevée » pour la tâche T_E et elle est significativement plus importante avec une combinaison étanche qu'avec une tenue Spo (respectivement p < 0,004 et p < 0,001).

Dans tous les cas, l'astreinte cardiaque est plus importante pour la tâche T_E (p < 0,001). La différence de charge physique entre le terrain et le laboratoire est confirmée par les données de dépense énergétique. En situation de travail, celle-ci, calculée à partir de l'observation du travail, est comprise entre 240 et 270 W.m⁻², soit une dépense modérée. Extrapolée à partir des valeurs de Fct et des résultats du step-test, la dépense énergétique moyenne est de 202 W.m⁻². En situation de laboratoire, selon la même procédure, la dépense énergétique moyenne est

de 427 W.m⁻² en T_N et de 664 W.m⁻² en T_E (différence de plus de 50 % entre les 2 tâches), soit des valeurs élevées rarement rencontrées en situation réelle de travail. Que ce soit pour les astreintes thermiques, cardiaques ou énergétiques, la tâche T_E est plus dure que la tâche T_N.

DONNÉES SUBJECTIVES

Les résultats de l'évaluation subjective sur la pénibilité du travail par l'échelle RPE et les 2 questions sur l'estimation de la durée de travail acceptable ou épuisante sont présentés dans le tableau III.

En entreprise, les salariés estiment leur travail « un peu dur ». Les durées de travail « acceptables » ($p < 0,01$) et « avant épuisement » ($p < 0,05$) sont significativement plus longues en tenue Mur qu'en tenue Tyv.

En laboratoire, les résultats subjectifs ne diffèrent pas entre les deux combinaisons. Les sujets considèrent leur travail « très léger » à « léger » en tenue Spo alors qu'il est plutôt « léger » voire « un peu dur » avec les combinaisons. À l'inverse des données objectives, les RPE, uniquement pour la tenue Spo, montrent que la tâche T_N est considérée plus difficile que la tâche T_E ($p < 0,02$) avec des durées estimées plus courtes en T_N qu'en T_E ($p < 0,004$).

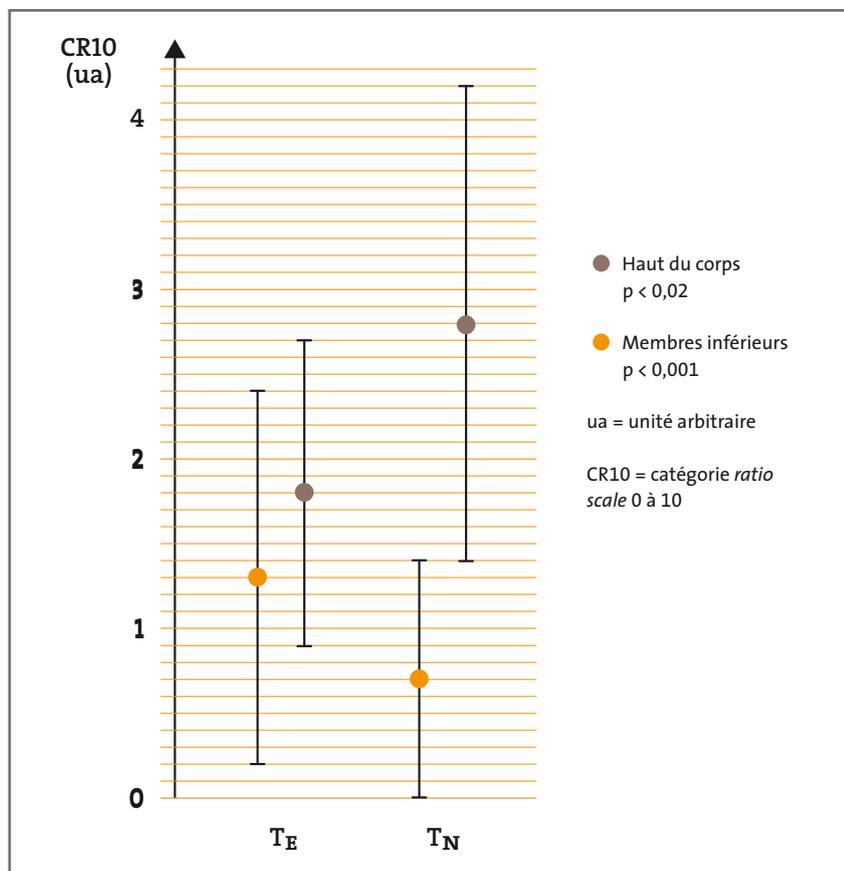
Par ailleurs, les résultats du CR10 obtenus en laboratoire permettent de distinguer les 2 tâches (figure 3).

En effet, les astreintes subjectives du haut du corps (avant-bras, bras, épaules) sont significativement ($p < 0,02$) plus importantes en T_N [2,8 ($\pm 1,4$) ua] qu'en T_E [1,8 ($\pm 0,9$) ua]. Inversement, les astreintes des membres inférieurs sont perçues significativement ($p < 0,001$) plus importantes en T_E [1,3 ($\pm 1,1$) ua] qu'en T_N [0,7 ($\pm 0,7$) ua].

Les échelles subjectives montrent que les astreintes respiratoires estimées ne diffèrent pas entre les 2 combinaisons dans les situations étudiées. Les sujets d'expérience comme les salariés sont peu gênés par les appareils de protection

respiratoire portés en tenue Tyv. En entreprise, la tenue Mur se démarque fortement de la tenue Tyv par son meilleur confort ($p < 0,01$), sa capacité à mieux rafraîchir ($p < 0,001$) et sa solidité ($p < 0,05$). Elle est jugée légèrement plus encombrante que la tenue Tyv ($p < 0,01$). En laboratoire, les deux tenues sont ressenties légèrement inconfortables, mais dans la tâche T_N la tenue Mur est significativement ($p < 0,005$) plus gênante que la tenue Tyv. La tenue Spo est, en toute logique, plus confortable ($p < 0,05$) et moins encombrante ($p < 0,05$) que les 2 combinaisons.

↓ Figure 3



Évaluation subjective de la pénibilité en fonction des tâches T_N et T_E et des segments corporels (avant-bras + épaule pour le haut du corps et jambes pour le bas du corps).

DISCUSSION

Des études physiques et physiologiques montrent qu'il existe des différences de perméabilité à l'air du tissu entre des tenues qui toutes sont dites étanches [52]. La perméabilité à l'air est l'indicateur pertinent de la perméabilité du tissu à la vapeur d'eau [27, 53, 54]. Si la protection physique du salarié est assurée, le port de vêtements plus perméables permettrait un meilleur refroidissement du corps par évaporation de la sueur et réduirait l'astreinte thermique. En situation de travail exploré dans la présente étude, la durée d'exposition observée et la contrainte thermique sont insuffisantes pour montrer de manière significative l'intérêt d'une tenue ventilée à partir des résultats objectifs. Néanmoins, les résultats subjectifs montrent que la tenue ventilée est largement préférée par les salariés.

➤ COMPARAISON DES COMBINAISONS

Les 3 paramètres d'astreinte thermique dT_{or} , EPCT et pertes sudorales, sont inférieures aux limites acceptables [23, 31]. Les dT_{or} et les pertes sudorales montrent que

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

l'astreinte en tenue ventilée Mur est inférieure à celle en tenue Tyv. Ce résultat est en accord avec les conclusions d'autres études menées avec des combinaisons ventilées refroidies [55 à 57].

Au cours du travail, l'humidité à l'intérieur de la tenue Tyv augmente progressivement jusqu'à atteindre un seuil de saturation qui limite la production de sueur et annule son évaporation et par conséquent l'évacuation de la chaleur [12, 13, 26]. En entreprise, lors d'expositions supérieures à une heure, l'air ambiant dans la tenue Mur permet l'évaporation de la sueur et donc une sudation plus importante alors que le seuil de saturation en vapeur d'eau est atteint avec la tenue Tyv. Cette dernière, en limitant la perte sudorale, favorise le stockage de chaleur.

Cependant, en situation de laboratoire, les résultats « s'inversent ». En effet, ce sont les tâches effectuées en tenue Tyv qui entraînent la sudation la plus importante. Cette discordance n'est qu'apparente et est liée aux différences de durée d'exposition. En situation de laboratoire, l'exposition dure 6 minutes ce qui permet à peine de recueillir le début de la mise en route de la sudation. En tenue Tyv, non ventilée, la température dans la combinaison augmente plus vite qu'en tenue Mur ce qui expliquerait une sudation plus précoce et plus importante qu'en tenue Mur. À l'inverse, dans la tenue Mur, la température de l'air, et donc la température cutanée, restent plus basses qu'en tenue Tyv retardant ainsi la mise en route de la sudation. Le mélange de ces 2 phénomènes lors d'expositions brèves explique que les sudations observées soient à l'inverse de ce qu'elles sont pour des expositions longues lorsque les réactions physiologiques sont sta-

bilisées. Ainsi, la tenue Mur semble plus intéressante en termes de confort et d'efficacité pour réduire la contrainte thermique que la tenue Tyv. Cependant, lors d'expositions longues, la tenue Mur augmente la perte hydrique ce qui peut exposer le salarié à une déshydratation plus rapide qu'en tenue Tyv. De plus, le maintien du débit d'air ($700 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) dans la tenue Mur est une difficulté technique à ne pas négliger [19]. Dans les cas d'expositions à la chaleur brèves et intenses, des systèmes techniques de refroidissement localisés ou des organisations de travail variées peuvent résoudre les risques d'inconfort ou de déséquilibre thermiques [58]. Lors d'expositions longues avec une contrainte thermique modérée, la problématique des tenues étanches risque d'alourdir les astreintes. Ces situations se développeraient dans l'avenir pour des raisons techniques déjà évoquées et même, à plus long terme, du fait du réchauffement climatique [59].

Des différences entre les deux combinaisons sont mises en évidence avec les échelles subjectives. Les salariés estiment que la tenue Mur est plus confortable, rafraîchissante et plus robuste que la tenue Tyv. Par contre, ils considèrent, comme les sujets de laboratoire, que la tenue Mur est plus gênante. L'opinion généralement favorable pour la tenue Mur se vérifie à la fois par un temps réel de travail plus long en entreprise et des estimations de durée de travail possible plus longues au laboratoire comme en entreprise. Le microclimat à l'intérieur de la combinaison ventilée améliore la sensation de confort. Différents auteurs [55 à 57] ont montré que la ventilation d'une tenue étanche avec de l'air ou un liquide refroidissant améliore à la

fois la réponse physiologique et le confort des sujets. L'hypothèse envisagée que l'encombrement de la tenue Mur gêne les sujets lors d'exercices de montée et descente d'une échelle à crinoline n'est pas vérifiée dans l'étude de laboratoire. On peut supposer que l'astreinte cardiaque due à l'encombrement de la tenue Mur est compensée par l'humidité dans la tenue Tyv qui colle à la peau et perturbe ainsi le mouvement. Enfin, les sujets ne se sont pas sentis gênés par les appareils de protection respiratoire portés avec la tenue Tyv.

➤ CHARGE PHYSIQUE DE TRAVAIL

Dans les conditions expérimentales, les combinaisons augmentent la dépense énergétique perçue qui passe de « très légère » en tenue Spo à « un peu dure » avec les 2 combinaisons, sans les distinguer. De même, le port de tenues étanches augmente l'astreinte cardiaque par rapport à la tenue Spo. Ce résultat pourrait expliquer en partie que les EPCT soient plus élevées avec les combinaisons qu'en tenue Spo. Pour l'astreinte cardiaque, et c'est l'un des résultats les plus importants de ce travail, son augmentation moyenne de 14 % entre la tenue Spo et les 2 combinaisons est 3 fois plus importante que celle calculée à partir du modèle de Dorman et Havenith [15]. Ces auteurs proposent une relation qui lie l'augmentation du métabolisme (dM) au poids du vêtement de protection (p) de la forme $dM = 2,7xp$. Ces données, utilisées dans des projets de normes, sous-estimeraient nettement la contrainte physique ajoutée par des combinaisons légères. L'encombrement des tenues, la gêne respiratoire occasionnée par le port de l'appareil de protection respiratoire, la sudation

plus importante dans certaines situations expliquent que les tenues étanches de protection individuelle sont significativement plus contraignantes qu'une tenue légère non étanche. Un moyen de réduire sensiblement les astreintes thermiques et cardiaques en ambiance chaude serait d'utiliser des combinaisons avec de l'air ou du liquide frais [55 à 57].

De façon plus générale, les combinaisons augmentent toujours la charge cardiaque et métabolique d'une tâche. Pour des tâches dures, cet accroissement peut devenir excessif. Les tenues ventilées sont plus confortables et maintiennent l'équilibre du bilan thermique. Elles sont considérées comme plus encombrantes en entreprises mais ne le sont pas dans les conditions pourtant exigeantes des 2 tâches de laboratoire. Pour conforter ces résultats, des études associant des durées d'exposition plus longues et des métabolismes plus élevés seraient nécessaires mais on arriverait alors à des conditions qui ne seraient pas supportables par des salariés non sportifs. Les résultats présentés ici complètent les données nécessaires pour définir des contraintes thermiques et métaboliques acceptables.

Les 2 tâches expérimentales imposées en laboratoire induisent de faibles astreintes thermiques mais de fortes astreintes physiques (travail physique dur, rythme rapide et posture gênante). Les résultats en T_N montrent que cette tâche, pourtant normalisée, induit une astreinte cardiaque élevée même chez des sujets sportifs.

Les valeurs moyennes de CCA dans ces tâches correspondent à un travail « modéré » à « très élevé » en fonction de la tenue et de la tâche [51]. Toutefois la FC ne dépasse pas le seuil de sécurité

de 85 % de la FCmax. Les 2 tâches exécutées au laboratoire diffèrent l'une de l'autre. Les valeurs élevées d'EPCT, de perte de sueur et d'astreinte cardiaque en T_E confirment que le travail physique général de monter et descendre d'un échafaudage et d'une échelle est plus contraignant que le travail physique de T_N dont la pénibilité est localisée au niveau des membres supérieurs et du dos. À l'inverse, les durées de travail estimées et les données subjectives du CR10 qui permettent de caractériser localement les pénibilités montrent que les salariés considèrent la tâche T_N plus difficile (figure 3).

Ainsi, il faut rappeler l'intérêt de l'évaluation subjective qui, dans les conditions de laboratoire étudiées, donne des informations que les critères objectifs ne montrent pas. En effet, les 2 tâches de laboratoire ne sont pas quantifiées de façon identique à partir des critères subjectifs et objectifs. La tâche T_E induit une astreinte cardiaque plus élevée que la tâche T_N alors que celle-ci est perçue plus pénible que la tâche T_E . Cette discordance est intéressante car elle témoigne, chez ces sujets actifs, qu'un travail dynamique, même s'il est dur (T_E), est perçu moins difficile qu'une activité à forte composante statique de travail local des bras (T_N). Les résultats subjectifs locaux (figure 3) confirment cette explication puisque le travail des jambes est perçu plus important en T_E . En effet, cette tâche impose un déplacement et des dénivelés à l'ensemble du corps alors que T_N est une tâche sans déplacement. Au niveau des bras, la tâche T_N est jugée logiquement plus difficile que T_E dans laquelle l'activité des bras est faible. Ce résultat montre que si la FC est un outil intéressant d'évaluation des astreintes au tra-

vail, l'information subjective en est un complément pertinent car elle permet de situer les astreintes au niveau de différentes localisations corporelles.

La dépense énergétique reste une variable difficile à déterminer. Dans cette étude, elle a été calculée selon 4 méthodes :

- subjective [49],
- coût cardiaque absolu (CCA),
- équivalent du CCA en consommation d'oxygène lors d'un effort sur step-test [46],
- description du travail en tâches élémentaires [48].

En entreprise, les données subjectives (RPE) classent le travail « un peu dur » en combinaison. Les risques les plus importants induits par ces tâches de désamiantage sont la posture et le travail des membres supérieurs qui provoquent des contraintes musculosquelettiques locales élevées [4, 44]. Les valeurs moyennes de CCA en entreprise caractérisent un travail « moyen » à « plutôt lourd » [50] ce qui est en accord avec les données subjectives. L'extrapolation de la dépense énergétique à partir du CCA et du test d'effort donne une valeur de 200 W.m² alors que l'observation par tâches primaires donne une valeur de 250 W.m². Ces résultats sont assez concordants et satisfaisants. Ils montrent qu'une méthode attentive d'observation permet de déterminer de façon assez précise la dépense énergétique [48].

Le **tableau IV** résume les principaux résultats de ce travail de comparaison entre 2 tenues étanches pour la dépense énergétique, le bilan thermique et le confort. Ces conclusions peuvent être utilisées dans toutes les conditions d'exposition à des contraintes thermiques. Elles sont particulière-

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

↓ **Tableau IV**

> **COMPARAISON DES COMBINAISONS TYVEK® (TYV) ET MURUROA® (MUR).**

	Tyv	Mur
Astreinte thermique	plus importante	moins importante
Charge physique (augmentation de la dépense énergétique)	Pas de différence entre les deux combinaisons	
Confort, rafraîchissement	moins	plus
Encombrement	moins	plus

ment utiles lorsque les contraintes thermiques ou métaboliques sont élevées.

CONCLUSION

Les résultats de ces deux études précisent les conséquences thermiques, cardiaques et métaboliques du port de tenues étanches et mettent en évidence les avantages respectifs des deux types de combinaisons. En situation réelle de travail, la tenue ventilée Mur réduit l'astreinte thermique et est jugée plus confortable, plus rafraîchissante mais plus encombrante que la tenue Tyv. L'étude de laboratoire sur 2 tâches physiquement dures dans des espaces restreints montre que la tenue Mur est uniquement gênante lors d'un travail local. Les résultats de cette étude de laboratoire ne per-

mettent pas de distinguer les deux combinaisons mais montrent que, comparées à une tenue légère de référence, elles augmentent significativement les astreintes subjectives et cardiaques. En conséquence, en situation de travail, si techniquement il est possible de proposer une combinaison ventilée, cette solution est toujours préférable à une tenue non ventilée. En effet, celle-ci est peu confortable et risque de provoquer une élévation excessive de la température centrale en cas de port prolongé. À l'inverse, bien que plus confortable, le port prolongé d'une tenue ventilée complète expose au risque de déshydratation auquel il faut rester attentif. La mise à disposition de ces tenues doit s'assurer que le débit minimum dans la combinaison est au moins égal à 700 L.min⁻¹. Ce critère technique est une difficulté majeure dans leur utilisation.

POINTS À RETENIR

- Une combinaison étanche ventilée diminue sensiblement l'astreinte thermique, est plus confortable et autorise des durées de travail plus longues qu'une combinaison étanche non ventilée mais est plus encombrante et expose au risque de déshydratation.
- En cas de métabolisme élevé, les 2 combinaisons augmentent sensiblement les astreintes objective et subjective.
- La gêne perçue lors d'activités menées dans des espaces confinés est faible pour les 2 combinaisons.
- La mesure de la fréquence cardiaque permet à la fois de quantifier la dépense énergétique et d'évaluer l'augmentation de la température centrale, remplaçant ainsi les indices d'astreinte normalisés quand ceux-ci sont inutilisables.
- Les évaluations subjectives sont en mesure de détailler des points d'inconfort précis comme des déséquilibres d'astreintes entre le haut et le bas du corps.
- En respectant des conditions d'utilisation précises, les approches intégrant la mesure de la fréquence cardiaque et les évaluations subjectives sont en capacité de définir des environnements de travail sûrs et acceptables.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | SUMER 2003 - Les expositions aux risques professionnels - Les ambiances et les contraintes physiques - Résultats SUMER 2003. Document d'études DARES n° 115. Ministère du Travail, de l'Emploi, de la Formation professionnelle et du dialogue social, 2006 (<http://travail-emploi.gouv.fr/etudes-recherche-statistiques-de,76/etudes-et-recherche,77/publications-dares,98/documents-d-etudes,327/2006-115-les-expositions-aux,3488.html>).
- 2 | NOAKES TD, MYBURGH KH, DU PLESSIS J, LANG L ET AL. - Metabolic rate, not percent dehydration, predicts rectal temperature in marathon runners. *Med Sci Sport Exerc.* 1991 ; 23 (4) : 443-49.
- 3 | SMOLANDER J, LOUHEVAARA V, TUOMI T, KORHONEN O ET AL. - Cardiorespiratory and thermal effects of wearing gas protective clothing. *Int Arch Occup Environ Health.* 1984 ; 54 (3) : 261-70.
- 4 | WHITE MK, HODOUS TK - Reduced work tolerance associated with wearing protective clothing and respirators. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1987 ; 48 (4) : 304-10.
- 5 | BISHOP P, RAY P, RENEAU P - A review of the ergonomics of work in the US military chemical protective clothing. *Int J Ind Ergon.* 1995 ; 15 (4) : 271-83.
- 6 | CORTILI G, MOGNONI P, SAIBENE F - Work tolerance and physiological responses to thermal environment wearing protective NBC clothing. *Ergonomics.* 1996 ; 39 (4) : 620-33.
- 7 | McLELLAN TM - Heat strain while wearing the current Canadian or a new hot-weather French NBC protective clothing ensemble. *Aviat Space Environ Med.* 1996 ; 67 (11) : 1057-62.
- 8 | LEVINE L, JOHNSON RF, TEAL WB JR, MERULLO DJ ET AL. - Heat strain evaluation of chemical protective garments. *Aviat Space Environ Med.* 2001 ; 72 (4) : 329-35.
- 9 | MURPHY MM, PATTON J, MELLO R, BIDWELL T ET AL. - Energy cost of physical task performance in men and women wearing chemical protective clothing. *Aviat Space Environ Med.* 2001 ; 72 (1) : 25-31.
- 10 | YOUNG AJ, O'BRIEN C, SAWKA MN, GONZALES RR - Physiological problems associated with wearing NBC protective clothing during cold weather. *Aviat Space Environ Med.* 2000 ; 71 (2) : 184-89.
- 11 | PIEDRAHITA H, OKSA J, MALM C, SORMUNEN E ET AL. - Effects of cooling and clothing on vertical trajectories of the upper arm and muscle functions during repetitive light work. *Eur J Appl Physiol.* 2008 ; 104 (2) : 183-91.
- 12 | WHITE MK, HODOUS TK, HUDNALL JB - Physiological and subjective responses to working in disposable protective coveralls and respirators commonly used by the asbestos abatement industry. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1989 ; 50 (6) : 313-19.
- 13 | HOLMÉR I, NILSSON H, RISSANEN S, HIRATA K ET AL. - Quantification of heat balance during work in three types of asbestos-protective clothing. *Int Arch Occup Environ Health.* 1992 ; 64 (4) : 243-49.
- 14 | BERNARD TE, CARAVELLO V, SCHWARTZ SW, ASHLEY CD - WBGT clothing adjustment factors for four clothing ensembles and the effects of metabolic demands. *J Occup Environ Hyg.* 2008 ; 5 (1) : 1-5.
- 15 | DORMAN LE, HAVENITH G - The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *Eur J Appl Physiol.* 2009 ; 105 (3) : 463-70.
- 16 | BAKER SJ, GRICE J, ROBY L, MATTHEWS C - Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics.* 2000 ; 43 (9) : 1350-58.
- 17 | BRUCE-LOW SS, COTTERRELL D, JONES GE - Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises. *Ergonomics.* 2007 ; 50 (1) : 80-98.
- 18 | BARR D, GREGSON W, REILLY T - The thermal ergonomics of firefighting reviewed. *Appl Ergon.* 2010 ; 41 (1) : 161-72.
- 19 | WILLIAMS-BELL FM, BOISSEAU G, MCGILL J, KOSTIUK A ET AL. - Air management and physiological responses during simulated firefighting tasks in a high-rise structure. *Appl Ergon.* 2010 ; 41 (2) : 251-59.
- 20 | TURPIN-LEGENBRE E, MEYER JP - Comparison of physiological and subjective strain in workers wearing two different protective coveralls for asbestos abatement tasks. *Appl Ergon.* 2003 ; 34 (6) : 551-56.
- 21 | TURPIN-LEGENBRE E, MEYER JP - Comparison of physiological and subjective strains of two protective coveralls in two short physically simulated demanding tasks. *Appl Ergon.* 2007 ; 38 (2) : 249-52.
- 22 | MAIRIAUX P, MALCHAIRE J - Le travail en ambiance chaude. Principes, méthodes, mise en œuvre. Collection de monographies de médecine du travail 7. Paris : Masson ; 1990 : 172 p.
- 23 | NF EN ISO-9886 - 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.
- 24 | MAIRIAUX P, SAGOT JC, CANDAS V - Oral temperature as an index of core temperature during heat transients. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1983 ; 50 (3) : 331-41.
- 25 | MEYER JP, MARTINET C, PAYOT L, DIDRY G, ET AL. - Evaluation de l'astreinte thermique à l'aide de la fréquence cardiaque. *Trav Hum.* 2001 ; 64 (1) : 29-44.
- 26 | CANDAS V, BOTHOREL B - Hydratation, travail et chaleur. Note documentaire ND 1727. Fiche d'hygiène de vie au travail 1. *Cah Notes Doc.* 1989 ; 135 : 241-45.
- 27 | BRÔDE P, HAVENITH G, WANG X, CANDAS V ET AL. - Non-evaporative effects of a wet mid layer on heat transfer through protective clothing. *Eur J Appl Physiol.* 2008 ; 104 (2) : 341-49.
- 28 | VOGT JJ - Confort physiologique. Technique de l'ingénieur B 2180. Paris : Technique de l'ingénieur ; 1985 10 p.
- 29 | PARSONS KC - Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. The principles and the practice. London : Taylor and Francis ; 1993, 359 p.

Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique

BIBLIOGRAPHIE

- 30 | **ERGONOMIE DES AMBIANCES THERMIQUES.** Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. Norme française homologuée NF EN ISO 7730. Mars 2006. Indice de classement X 35-203. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2006 : 59 p.
- 31 | **VOGT JJ, METZ B** - Ambiance thermique. In: Scherrer J - Précis de physiologie du travail. Notions d'ergonomie. 2^e édition. Paris : Masson ; 1981 : 217-63, 585 p.
- [32] **MALCHAIRE J** - Travail à la chaleur. Encyclopédie médico-chirurgicale. Toxicologie, pathologie professionnelle 16-782-A-10. Paris : Éditions scientifiques et médicales Elsevier ; 2004 : 14 p.
- 33 | **CASA DJ, KENNY GP, TAYLOR NA** - Immersion treatment for exertional hyperthermia: Cold or temperate water? *Med Sci Sports Exerc.* 2010 ; 42 (7) : 1246-52.
- 34 | **WASTERLUND DS** - A review of heat stress research with application to forestry. *Appl Ergon.* 1998 ; 29 (3) : 179-83.
- 35 | **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.
- 36 | **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.
- 37 | **GUN RT, BUDD GM** - Effects of thermal, personal and behavioural factors on the physiological strain, thermal comfort and productivity of Australian shearers in hot weather. *Ergonomics.* 1995 ; 38 (7) : 1368-84.
- 38 | **RAMSEY JD** - Task performance in heat: a review. *Ergonomics.* 1995 ; 38 (1) : 154-65.
- 39 | **FAERVIK H, REINERTSEN RE** - Effects of wearing aircrew protective clothing on physiological and cognitive responses under various ambient conditions. *Ergonomics.* 2003 ; 46 (8) : 780-99.
- 40 | **NF EN ISO-27243** - Ambiances chaudes. Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir). Norme française homologuée NF EN 27243. ISO 7243. Février 1994. Indice de classement X 35-201. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 1994 : 14 p.
- 41 | **MEYER JP, RAPP R** - Survey of heat stress in industry. *Ergonomics.* 1995 ; 38 (1) : 36-46.
- 42 | **MORAN DS** - Stress evaluation by the physiological strain index (PSI). *J Basic Clin Physiol Pharmacol.* 2000 ; 11 (4) : 403-23.
- 43 | **NF EN ISO-10551** - Ergonomie des ambiances thermiques. Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs. Norme française homologuée NF EN ISO 10551. Juin 2001. Indice de classement X 35-209. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 2001 : 28 p.
- 44 | **RISSANEN S, SMOLANDER J, LOUHEVAARA V** - Work load and physiological responses during asbestos removal with protective clothing. *Int Arch Occup Environ Health.* 1991 ; 63 (4) : 241-46.
- 45 | **MEYER JP** - Astreinte physiologique lors d'opérations de retrait d'amiante. Ergonomie TL 21. *Doc Méd Trav.* 1997 ; 69 : 19-26.
- 46 | **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. Ergonomie TL 16. *Doc Méd Trav* 1995 ; 64 : 245-52.
- 47 | **APPAREILS DE PROTECTION RESPIRATOIRE.** Méthode d'essai. Partie 2 : essais pratiques de performance. Norme française homologuée NF EN 13274-2. Avril 2001. Indice de classement S 76-007-2. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 2001 : 13 p.
- 48 | **HORWAT F, MEYER JP, MALCHAIRE J** - Validation of a new pocket computer assisted method for metabolic rate estimation in field studies. *Ergonomics.* 1988 ; 31 (8) : 1155-64.
- 49 | **BORG G** - Borg's perceived exertion and pain scales. Champaign : Human Kinetics ; 1998 : 104 p.
- 50 | **CHAMOUX A, BOREL AM, CATILINA P** - Pour la standardisation d'une fréquence cardiaque de repos. La fréquence cardiaque de repos nocturne. Implications dans l'évaluation de la charge de travail *Arch Mal Prof.* 1985 ; 46 (4) : 241-50.
- 51 | **MONOD H, KAPITANIAK B** - Ergonomie. 2^e édition. Abrégés de médecine. Paris : Masson ; 2003 : 286 p..
- 52 | **GONZALEZ NW, BERNARD TE, CARROLL NL, BRYNER MA ET AL.** - Maximum sustainable work rate for five protective clothing ensembles with respect to moisture vapor transmission rate and air permeability. *J Occup Environ Hyg.* 2006 ; 3 (2) : 80-6.
- 53 | **CARAVELLO V, McCULLOUGH EA, ASHLEY CD, BERNARD TE** - Apparent evaporative resistance at critical conditions for five clothing ensembles. *Eur J Appl Physiol.* 2008 ; 104 (2) : 361-67.
- 54 | **BERNARD T, ASHLEY C, TRENTACOSTA J, KAPUR V, ET AL.** - Critical heat stress evaluation of clothing ensembles with different levels of porosity. *Ergonomics.* 2010 ; 53 (8) : 1048-58.
- 55 | **VALLERAND AL, MICHAS RD, FRIM J, ACKLES KN** - Heat balance of subjects wearing protective clothing with a liquid- or air-cooled vest. *Aviat Space Environ Med.* 1991 ; 62 (5) : 383-91.
- 56 | **McLELLAN TM, FRIM J, BELL DG** - Efficacy of air and liquid cooling during light and heavy exercise while wearing NBC clothing. *Aviat Space Environ Med.* 1999 ; 70 (8) : 802-11.
- 57 | **WILLIAMSON R, CARBO J, LUNA B, WEBBON BW** - A thermal physiological comparison of two HAZMAT protective ensembles with and without active convective cooling. *J Occup Env Med.* 1999 ; 41 (6) : 453-63.
- 58 | **ZHANG Y, BISHOP PA, GREEN JM, RICHARDSON MT ET AL.** - Evaluation of a carbon dioxide personal cooling device for workers in hot environments. *J Occup Environ Hyg.* 2010 ; 7 (7) : 389-96.
- 59 | **KOVATS RS, HAJAT S** - Heat stress and public health: a critical review. *Annu Rev Public Health.* 2008 ; 29 : 41-55.