

Travailler dans une ambiance thermique chaude

AUTEURS :

L. Robert¹, E. Turpin-Legendre², J. Shettle³, C. Tissot⁴, C. Aubry⁵, B. Siano⁶

EN RÉSUMÉ

1. département Ingénierie des procédés, INRS - 2. département Homme au travail, INRS - 3. service juridique, INRS - 4. département Études, veille et assistance documentaires, INRS - 5. Direction des études et recherches, INRS - 6. département Études et assistance médicales, INRS

Nombre de salariés peuvent travailler dans une ambiance thermique chaude, à l'extérieur ou à leur poste de travail, liée directement à leur activité professionnelle ou au climat, lors d'une canicule par exemple. Ils sont ainsi exposés à des risques pour la santé parfois graves et à des accidents de travail. Ce dossier rappelle les effets physiologiques de la chaleur sur le corps humain et les risques pour la santé. Sont ensuite présentés les différents paramètres des échanges thermiques et leurs mécanismes. L'évaluation des risques peut se faire à partir de la mesure de la contrainte thermique ou de la détermination de l'astreinte thermique au poste de travail. La prévention fait appel à des actions techniques, organisationnelles et individuelles, s'appuyant sur des dispositions réglementaires spécifiques et sur le rôle des services de santé au travail.

MOTS CLÉS

Travail à la chaleur / Conditions de travail / Organisation du travail / Évaluation des risques / Réglementation



De nombreux métiers obligent les salariés à évoluer dans des environnements marqués par des températures élevées. De plus, en période estivale, les salariés sont susceptibles d'être exposés à de fortes chaleurs, dont les effets se feront particulièrement sentir si leur poste de travail produit de la chaleur ou si leurs tâches nécessitent une activité physique intense.

Sont particulièrement concernés par les ambiances de travail chaudes d'une part les professionnels qui travaillent à la chaleur de

façon plus ou moins permanente (certains postes industriels tels que les fondeurs, verriers, soudeurs, les métiers du textile, de la teinturerie-blanchisserie, les pompiers, les boulangers, les cuisiniers...), d'autre part les personnes qui travaillent à l'extérieur en été (construction, travaux routiers, mines à ciel ouvert, agriculture, travailleurs forestiers, des espaces verts, salariés du transport, représentants, ripeurs...).

La forte chaleur a en effet un impact sur l'état de santé dont la dégradation brutale nécessite des soins urgents pour hyperthermie,

Travailler dans une ambiance thermique chaude

déshydratation, troubles neurologiques pouvant conduire à la perte de conscience et au coma. Une étude française, publiée en 2018, a montré que les effets de la température sur la santé, et particulièrement sur la mortalité, ne sont pas restreints aux températures extrêmes [1] et que l'augmentation du risque est globalement plus marquée et plus rapide pour la chaleur que pour le froid.

La canicule de l'été 2003, la plus grave jamais enregistrée en France, a causé un excès de plus de 15 000 décès en 19 jours, celle de 2006 près de 1 400 sur une période de 11 jours [2]. Chaque année depuis 2004, la Direction générale de la santé pu-

blie un plan national canicule ([encadré 1](#)). Par ailleurs, le changement climatique en cours a fait l'objet d'un avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) en janvier 2018 [4] qui recommande de renforcer la mobilisation du monde du travail et de surveiller les effets liés à l'impact du changement climatique sur les risques professionnels.

Dans ce contexte, cet article aborde d'abord les aspects physiologiques concernant l'homme et la chaleur, puis les effets néfastes sur la santé d'une ambiance thermique chaude. Les modalités d'évaluation des risques sont ensuite détaillées,

puis les mesures de prévention et les dispositions réglementaires sont présentées.

PHYSIOLOGIE

LES ÉCHANGES THERMIQUES DU CORPS HUMAIN

L'homme est homéotherme, tous les mécanismes physiologiques tendent à maintenir sa température centrale relativement constante proche de 37 °C. Un ensemble de processus physiologiques appelé la thermorégulation permet cette relative constance de la température centrale. Pour cela,

↳ Encadré 1

UN PLAN NATIONAL CANICULE

« Par définition, on parle de canicule lorsque les températures observées sont élevées jour et nuit pendant trois jours d'affilée. Des seuils d'alerte ont été déterminés par Météo-France à partir de trente années de données quotidiennes de mortalité et de différents indicateurs météorologiques. Les diverses régions de France étant plus ou moins habituées et donc adaptées à la chaleur, les seuils d'alerte ne sont pas les mêmes partout. Ainsi, Météo-France estime que la canicule sera avérée dans les Deux-Sèvres lorsque des températures minimales de 35 °C le jour et 20 °C la nuit seront observées. La Haute-Loire, elle, sera considérée en canicule lorsque les températures dépasseront 32 °C le jour et 18 °C la nuit. À Paris, ces seuils sont de 31 °C le jour et 21 °C la nuit, ou encore à Marseille de 35 °C le jour et 24 °C la nuit ».

Chaque année depuis 2004, la Direction générale de la santé (DGS) publie un plan national canicule (PNC), qui a pour objectif de définir par anticipation les actions à mettre en œuvre aux niveaux local et national pour prévenir et limiter les effets sanitaires des fortes chaleurs estivales. Il vise à l'instantanéité des recueils d'informations

climatiques et sanitaires sur l'ensemble du territoire et regroupe autour de Météo-France et Santé publique France l'ensemble des ministères concernés. Des recommandations destinées à tous les intervenants potentiels, dans les différentes circonstances possibles, permettent de généraliser les bonnes réponses. Une des fiches concerne les travailleurs et rappelle qu'il est de la responsabilité de l'employeur de prendre en considération le risque de fortes chaleurs dans sa démarche d'évaluation des risques et de mettre en œuvre des mesures de prévention, généralement simples, en aménageant l'organisation du travail, pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs.

L'impact des canicules les plus récentes est estimé respectivement à 1 700 décès en 2015 et 345 décès en 2017. Au cours de l'été 2018, un épisode caniculaire de 10 jours a été enregistré, le plus long depuis 2006, provoquant environ 1 600 morts de plus qu'un été normal [2]. Par ailleurs, Santé publique France a reçu, pour l'été 2017, 73 signalements d'événements sanitaires chez des travailleurs en lien possible avec la

chaleur extérieure, dont 10 décès sur le lieu de travail, et pour l'été 2018, le signalement de 8 décès sur le lieu de travail en lien suspecté avec la chaleur.

« Une instruction interministérielle du 22 mai 2018 reconduit en 2018 les dispositions du PNC 2017. En revanche, pour tenir compte des retours d'expériences des années passées, cette instruction introduit l'extension de la période de veille saisonnière, du 1^{er} juin au 15 septembre et précise la nouvelle terminologie associée à la gestion des effets sanitaires des vagues de chaleur. Le PNC 2017 précise, pour sa part, les objectifs, les différents niveaux du plan et les mesures de gestion qui s'y rapportent, ainsi que le rôle des différents partenaires. L'application du dispositif prévu par le PNC aux travailleurs ainsi que le dispositif réglementaire applicable en milieu de travail en période de fortes chaleurs y sont également détaillés ».

Le Haut Conseil de santé publique a publié en 2014 des recommandations au plan canicule, la fiche action I. 3. I s'adresse aux employeurs et à leur équipe d'encadrement. Par ailleurs, des fiches techniques s'adressent aux professionnels de santé [3].

↓ Encadré 2

> LES MÉCANISMES DES ÉCHANGES THERMIQUES

La thermorégulation et le bilan thermique d'un individu dans un environnement donné sont deux processus qui font appel aux mêmes types de mécanismes de transferts thermiques dont l'objectif est de dissiper la chaleur du noyau central (organes) vers la périphérie (peau) et de la périphérie vers le milieu environnant (air, eau).

La convection : les échanges ont lieu entre un solide (corps) et un fluide (eau, sang, air environnant) de températures différentes lorsqu'il y a un déplacement de l'un par rapport à l'autre. Au sein même du corps, ces échanges thermiques ont lieu entre la circulation sanguine et les organes profonds, les tissus sous-cutanés et la peau. Ce type d'échange se retrouve aussi au niveau de la respiration entre les poumons et l'air ambiant où généralement l'air inspiré se réchauffe au contact des voies respiratoires. Entre l'individu et son environnement, ces échanges par convection sont fortement dépendants de la température et de la vitesse de l'air dans lequel évolue le sujet. En convection, on différencie deux mécanismes : la convection naturelle dès lors que le sujet se trouve dans un environnement où l'air est statique et la convection forcée, dès que l'air est animé d'une vitesse (ventilation, déplacement de l'individu par exemple). Dans ce dernier cas, les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement sont plus efficaces. C'est un mécanisme prépondérant dans les échanges thermiques humains.

La conduction : les échanges par conduction apparaissent dès lors que 2 solides de température différente sont en contact (peau-vêtement, peau-outil, organe-organe...). Ce transfert de chaleur s'établit du point le plus chaud vers le plus froid. En milieu du travail, ces échanges sont le plus souvent négligeables car la surface d'échange est souvent restreinte et l'écart de température faible (exception de cas extrêmes comme les brûlures

cutanées) mais ils peuvent avoir une influence sur la sensation de confort thermique.

Le rayonnement : les échanges par rayonnement électromagnétique s'effectuent entre des surfaces de températures différentes et sans contact direct. Ils dépendent de la surface cutanée exposée aux échanges et des températures moyennes radiantes de chaque corps. Ce mécanisme de transfert thermique est très impactant sur le bilan thermique du corps. En milieu du travail, ces échanges peuvent être particulièrement significatifs et présenter un risque important comme lors d'un travail à proximité d'un four si des écrans et/ou des vêtements de protection appropriés ne sont pas utilisés.

L'évaporation : les échanges par évaporation de la sueur (Ev) prennent en compte deux phénomènes : la diffusion passive de la sueur à travers la peau (la perspiration) et l'évaporation de la sueur en surface de la peau, phénomène actif de la sudation (transpiration). En effet, au niveau de la peau, le passage des molécules d'eau de l'état liquide (sueur) à l'état gazeux (vapeur) se traduit par une consommation d'énergie importante à l'origine d'une déperdition significative de chaleur. Dans le cas de ces échanges par évaporation, la vitesse et l'humidité de l'air sont des facteurs clés, mais l'activité et la nature des vêtements portés par les sujets le sont aussi.

La respiration : les échanges par la respiration sont de deux types car l'inspiration et l'expiration de l'air s'accompagnent à la fois d'un échange de chaleur et d'eau. De ce fait, ces échanges entre le corps et son environnement se font en fonction de 2 paramètres : la différence de température et la différence de teneur en eau qu'il existe entre l'air dans les poumons et l'air environnant. La température et l'humidité de l'air, mais aussi l'activité du salarié par l'intermédiaire de son débit respiratoire, sont des paramètres déterminants.

il est nécessaire qu'il y ait un équilibre entre les apports et les pertes de chaleur. Les apports sont de deux sortes dont principalement la production interne de chaleur (thermogénèse) avec le métabolisme de base et l'activité physique mais aussi par l'absorption de chaleur du milieu extérieur (soleil, mur, air ambiant...). Les pertes de chaleur (thermolyse) ont lieu principalement au niveau de la peau et des voies respiratoires.

L'ensemble des organes profonds du corps (essentiellement les muscles, le système nerveux central et les viscères) produit de la chaleur qui sera éliminée vers le milieu ambiant au niveau de la surface cutanée. En neutralité thermique, ce transfert se réalise naturellement par un gradient de température à l'aide de la circulation sanguine (la chaleur va du milieu le plus chaud vers le plus froid). La peau est l'interface qui permet la perte de chaleur afin de conserver la température centrale stable autour de 37 °C, alors même que la température périphérique est variable.

Il existe plusieurs mécanismes d'échange de chaleur du corps avec l'environnement, et l'organisme possède deux systèmes d'échanges, la peau et les voies respiratoires. En physiologie, ces mécanismes sont la convection, la conduction, le rayonnement et l'évaporation (encadré 2).

L'ÉQUILIBRE DES ÉCHANGES THERMIQUES

Quel que soit le niveau métabolique et la température du milieu ambiant, la thermorégulation permet à un organisme de conserver une température constante. Elle repose sur un équilibre constant entre les apports (thermogénèse) et les pertes (thermolyse) de chaleur.

La thermogénèse, production de

chaleur, s'effectue grâce à l'activité métabolique des organes qui assurent les échanges de base tels que la respiration et la circulation sanguine. Cette production est relativement constante. Pour une personne de stature moyenne au repos dans un environnement neutre, elle est évaluée à 1700 kcal par jour pour un homme et 1500 kcal par jour pour une femme. De la chaleur est produite aussi lors de la digestion des aliments ou par une activité physique lors de contractions musculaires mais avec une production très variable.

La thermolyse est le processus qui permet la dissipation de la chaleur de l'organisme vers le milieu extérieur. Elle s'effectue grâce aux quatre mécanismes d'échanges thermiques vus précédemment (encadré 2). La perte par rayonnement infrarouge est le principal mode de perte de chaleur (elle représente environ 60 % des pertes de chaleur). L'organisme émet de la chaleur vers les objets ou les surfaces plus froids l'entourant. La perte de chaleur s'effectue aussi par convection (15 %). Le sang venant du noyau réchauffe la peau

Travailler dans une
ambiance thermique chaude

puis il y a perte de chaleur dans l'air ambiant. La peau au contact d'un corps froid perd de la chaleur par le phénomène de conduction (3 %). Les pertes par convection et conduction dépendent du gradient de température entre la peau et les fluides et solides avec lesquels elle est en contact. Les pertes par évaporation (environ 22 %) se font au niveau de la peau (perspiration et sudation) ainsi qu'au niveau des voies respiratoires mais avec un faible rendement.

L'organisme cherche à maintenir une température centrale constante grâce à une régulation conduisant à un équilibre entre les apports et les pertes de chaleur. Dans des environnements très chauds ou très froids, cet équilibre est difficile à maintenir.

Les différentes régulations pour maintenir cet équilibre sont présentées dans la figure 1.

La zone de confort thermique est une zone de neutralité thermique. L'équilibre des températures se fait de façon passive, l'organisme

utilise peu d'énergie pour lutter contre le chaud. La thermogénèse (au niveau du noyau) et la thermolyse (par la circulation cutanée et la respiration) sont de base et s'équilibrent facilement. Le corps est en homéothermie, sa température centrale est relativement stable autour de 37 °C.

La zone tolérable est une zone à l'intérieure de laquelle une thermogénèse et une thermolyse élevées permettent que l'homéothermie soit à peu près maintenue. En milieu chaud, les phénomènes de vasodilatation des vaisseaux sanguins et de sudation permettent la perte de chaleur.

La zone intolérable en environnement très chaud est une zone où le bilan thermique est non équilibré. La thermogénèse et la thermolyse n'arrivent pas à compenser les pertes et les apports. Le noyau n'arrive plus à s'adapter, la température centrale n'est plus stable et si son augmentation est excessive, l'hyperthermie peut être atteinte avec de graves conséquences sur la santé.

LES AMBIANCES CHAUDES

En ambiance chaude, l'apport de chaleur au niveau du noyau central se fait soit par convection, lorsque la température de l'air est supérieure à la température cutanée (inversion du gradient habituellement observé entre l'organisme et le milieu ambiant), soit par conduction, lorsqu'il y a un contact entre le corps et un solide dont la température est plus élevée. Dans les deux cas, la température de la peau augmente entraînant un réchauffement de la température du noyau. Pour compenser ces apports de chaleur, « l'écorce » (interface entre le noyau central et la peau) se modifie pour évacuer l'excédent de chaleur au niveau de la peau (figure 2). Le corps réagit en « ouvrant les vannes » pour qu'il y ait évacuation de la chaleur à l'aide des mécanismes de vasodilatation cutanée et de sudation accompagnés de l'augmentation du débit cardiaque. Si la température ambiante augmente excessivement, les échanges de chaleur ne suffisent pas pour

Figure 1 : L'équilibre des échanges thermiques

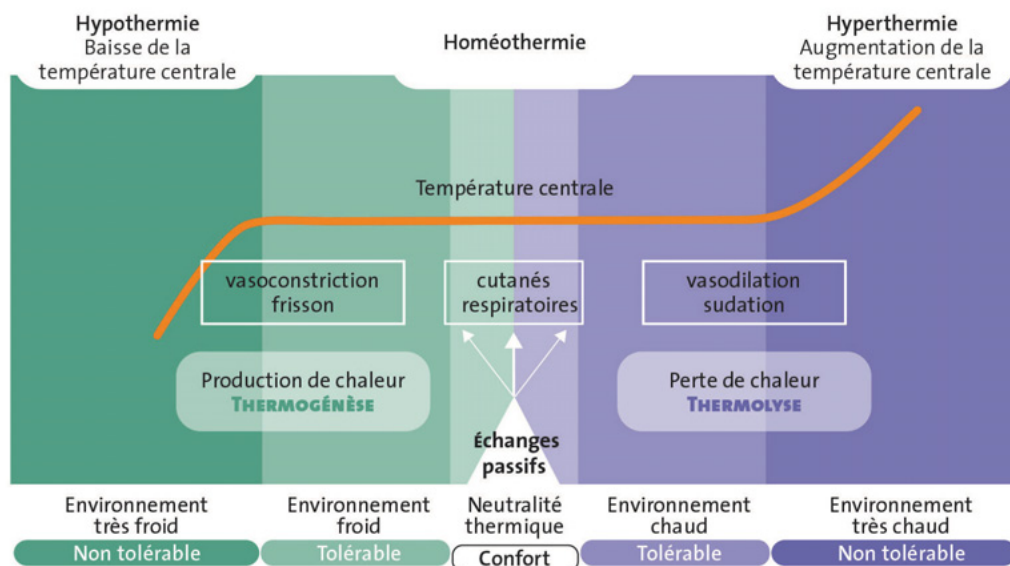
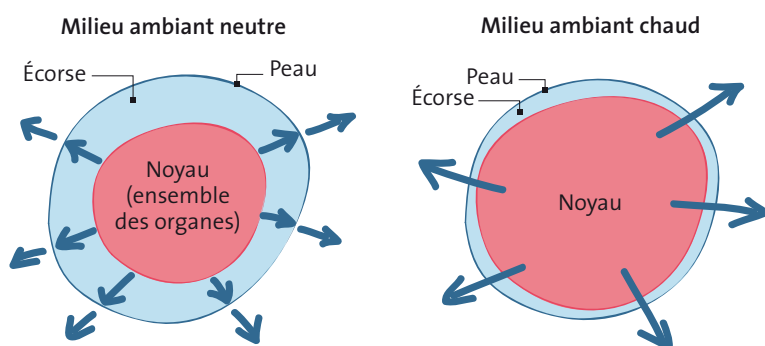


Figure 2 : Représentation schématique des échanges thermiques en milieu ambiant neutre et chaud



garder un bilan thermique équilibré ce qui entraîne un stockage de chaleur et une élévation forte de la température centrale, c'est l'hyperthermie.

En ce qui concerne la température centrale, la norme NF EN ISO 9886 [5] et l'Organisation mondiale de la santé [6] donnent des limites à ne pas dépasser (pour éviter une astreinte à la chaleur) : 38 °C de température centrale et un écart de 1 °C de la température centrale entre avant et après l'exposition à la chaleur.

LE PHÉNOMÈNE DE VASODILATATION CUTANÉE

Afin de baisser la température centrale, un transfert de chaleur se crée entre l'intérieur du corps et sa surface grâce à la circulation sanguine cutanée. Les vaisseaux sanguins cutanés augmentent de diamètre, ce qui augmente la circulation sanguine et le débit sanguin pour permettre une meilleure évacuation de la chaleur au niveau de la peau dans l'environnement. La vasodilatation cutanée s'accompagne d'une augmentation du débit cardiaque due à l'accélération de la fréquence cardiaque. Lors de la phase de récupération en environnement neutre, la fréquence cardiaque revient progressivement à sa valeur de base après 3 minutes de repos.

La température cutanée est un paramètre à prendre en compte lors de l'évaluation des ambiances thermiques que peuvent subir les salariés, c'est un critère de confort qu'il ne faut pas sous-estimer. La température cutanée se situe autour de 33 °C [7] avec des températures de confort entre 32 et 34 °C [8, 9] sachant que le seuil de douleur est reconnu à 43 °C [5].

LE PHÉNOMÈNE DE SUDATION

La sudation est un phénomène actif qui du fait de son évaporation à la surface de la peau est le moyen le plus efficace de perdre de la chaleur. Aussi, la sudation est effective en terme de perte de chaleur si la sueur ne ruisselle pas, si elle n'est pas époncée et si l'air ambiant n'est pas saturé en vapeur d'eau. Lorsque les températures de la peau, de l'air et des parois s'égalisent, l'évaporation de la sueur (sécrétée par les glandes sudoripares) est la seule voie possible pour le corps pour perdre de la chaleur.

Il faut être attentif au phénomène de déshydratation qui peut survenir lors de sudation importantes car ce phénomène entraîne une perte d'eau et de sels minéraux. La perte hydrique maximale doit être limitée à 5 % de la masse corporelle si les personnes peuvent boire librement et à 3 % de la masse cor-

porelle s'il n'y a pas de possibilité de s'hydrater [5, 10].

FACTEURS PHYSIOLOGIQUES INFLUENÇANT LA THERMORÉGULATION

ACCLIMATATION

L'acclimatation est une adaptation physiologique transitoire permettant à l'homme, après une exposition de 8 à 12 jours, de s'habituer à la chaleur. C'est un phénomène progressif dont les effets débutent dès le 1^{er} jour et se stabilisent vers le 3^e, 4^e jour. Cette acclimatation se perd après environ 8 jours sans exposition à la chaleur, ce qui demande d'être vigilant lorsque les salariés ne sont plus exposés, par exemple lors de retour de congés.

Le salarié acclimaté à la chaleur présente des adaptations physiologiques qui se manifestent par une réduction de sa température centrale et de sa fréquence cardiaque de travail. Le seuil de déclenchement de la vasodilatation cutanée est abaissé et de même, la sudation intervient plus tôt, c'est-à-dire qu'elle survient pour des températures centrales moins élevées. Le salarié acclimaté a une sudation plus abondante, surtout en ambiance humide, avec une concentration en sels minéraux plus faible (préservation de l'équilibre électrolytique de l'organisme) et une meilleure répartition de la sueur sur le corps qu'une personne non acclimatée.

CONDITION PHYSIQUE ET ACTIVITÉ PHYSIQUE

Une bonne condition physique et un entraînement physique améliorent les capacités cardio-vasculaires, ainsi les réponses physiologiques de la personne exposée à la chaleur sont mieux adaptées. De ce fait, les capacités d'évacuation de la

Travailler dans une ambiance thermique chaude

chaleur corporelle et d'adaptation sont améliorées (débit sudoral plus important, concentration en sels minéraux plus faible...). La masse corporelle a un effet sur les capacités thermorégulatrices. Chez les personnes obèses, les capacités de thermorégulation sont diminuées dues principalement au fait que les capacités cardio-vasculaires sont moindres et le rapport surface cutanée (pour la dissipation de chaleur) et poids de corps (pour la génération de chaleur) est faible. En effet, leur excès de poids demande un plus grand effort musculaire à chaque mouvement d'où une production de chaleur plus importante.

ÂGE

Les mécanismes de thermorégulation diffèrent aux âges extrêmes de la vie. Ils manquent d'efficacité par l'immaturité du système nerveux central chez le nouveau-né et chez la personne avancée en âge. La dégradation de la tolérance à la chaleur chez les personnes vieillissantes est due à différents mécanismes tels qu'une baisse des capacités cardio-vasculaires et de la vasodilatation des vaisseaux sanguins, une élévation du seuil de déclenchement de la sudation et une température centrale plus longue à revenir à la normale. Soixante-dix pour cent des coups de chaleur surviennent chez des personnes de plus de 60 ans.

GENRE

Les différences morphologiques et fonctionnelles sont importantes entre l'homme et la femme, ce qui se traduit par une moins grande capacité physique chez la femme (moins de masse musculaire, un volume de sang réduit, une moindre capacité de transport de l'oxygène dans le sang). Ces différences expliquent la variabilité des capacités thermoré-

gulatrices entre les deux sexes. Ainsi, les femmes transpirent moins, le déclenchement sudoral est plus lent et les températures centrales et cutanées sont plus élevées, surtout en atmosphère humide. Cependant, après acclimatation à la chaleur et à capacités aérobiques similaires, ces différences hommes-femmes disparaissent [11].

RYTHME NYCTHÉMÉRAL

La température centrale augmente au cours de la journée, en raison de la production de chaleur provenant de l'activité musculaire, pour atteindre son maximum autour de 17h. La température centrale minimale s'observe entre 3h et 5h du matin, ce qui est dû au repos physique et à l'influence du sommeil lent au cours duquel la température de référence diminue.

EFFETS SUR LA SANTÉ

La thermorégulation peut être altérée par différents mécanismes, ce qui peut conduire à des effets délétères pour la santé. Parmi ces mécanismes : une cytotoxicité directe de la chaleur à l'origine de lésions de l'hypothalamus et du système nerveux autonome, une réponse inflammatoire systémique aspécifique par production excessive de cytokines pro-inflammatoires (liées à un exercice musculaire prolongé ou à un certain niveau de souffrance ischémique mésentérique due à la redistribution préférentielle du flux sanguin vers les muscles et la peau), une activation de la coagulation avec apparition de lésions endothéliales, de microthromboses vasculaires entraînant une altération de la microcirculation préjudiciable à l'efficacité de la thermorégulation.

De plus, la sudation peut être ren-

due plus ou moins inefficace par les conditions atmosphériques (degré hygrométrique de l'air ambiant élevé et mouvement d'air faible), l'inhibition des glandes sudoripares (par dysfonction du système cholinergique) ou l'épuisement de leurs capacités.

Les conséquences sanitaires de l'exposition à une ambiance thermique chaude sont liées au dépassement des capacités d'adaptation physiologiques de l'organisme. S'y ajoutent des effets neuropsychologiques, notamment cognitifs, qui jouent un rôle important dans l'impact global de la chaleur en milieu professionnel [4].

Les données épidémiologiques relatives aux effets sanitaires de conditions climatiques chaudes sur les travailleurs français sont très peu nombreuses. Des données internationales confirment néanmoins l'existence d'une augmentation de la mortalité et surtout de la morbidité globale des populations de travailleurs en période estivale, en lien avec la survenue de pathologies induites par la contrainte thermique mais aussi avec une hausse des accidents du travail. Ces effets touchent tout particulièrement les travailleurs dont les activités se déroulent en extérieur. Ils sont plus marqués lors des premiers épisodes de chaleur de l'été, ce qui prouve l'effet bénéfique de l'acclimatation [4].

MANIFESTATIONS DIRECTEMENT LIÉES À LA CHALEUR

Les affections directement liées à la chaleur peuvent être décrites selon une échelle de gravité croissante [12], sans que les différents niveaux puissent être précisément liés à une valeur de température corporelle, puisque la réponse physiologique au stress thermique varie d'une personne à l'autre.

■ **Dermite de chaleur** : il s'agit d'une éruption cutanée très irritante, faite de macules et papules, siégeant sur les parties couvertes, par phénomène de macération lié à la sueur, favorisée par le port de tissus synthétiques.

■ **Œdème des extrémités** : la chaleur provoque une vasodilatation périphérique, avec une gêne au retour veineux. Cet œdème de chaleur siège aux extrémités des membres inférieurs. Il touche surtout les sujets ayant des troubles vasculaires (insuffisance veineuse, hypertension, diabète), les femmes d'un certain âge. Il est favorisé par la sédentarité.

■ **Crampes de chaleur** : il s'agit de spasmes musculaires douloureux accompagnés de transpiration intense. Ils sont favorisés par l'effort musculaire (travail de force) et surviennent typiquement lors de l'arrêt de l'activité musculaire. Ces crampes touchent les muscles des membres ou les muscles abdominaux. Elles sont dues à une déshydratation entraînant un déséquilibre en électrolytes (sodium, potassium, magnésium, calcium).

■ **Syncopé** : il s'agit d'une perte de connaissance brève par hypotension orthostatique, qui survient à l'arrêt d'un effort physique intense en environnement chaud, et récupère en position allongée.

■ **Syndrome d'épuisement-déshydratation** : plus grave, il apparaît en quelques jours suite à l'altération du métabolisme hydrosodé provoquée notamment par la perte sudorale (perte excessive d'eau et de sels) et comprend une asthénie, une transpiration abondante, des maux de tête, des nausées, des syncopes, des troubles du sommeil (agitation nocturne) et du comportement, mais pas de troubles neurologiques. La température corporelle peut dépasser 38° mais sans atteindre 40°. La prise en charge

repose sur le repos complet dans un endroit sec et frais, un refroidissement corporel actif (humidification et ventilation cutanée, vessie de glace) et la réhydratation orale.

■ **Coup de chaleur** : c'est une défaillance aiguë de la thermorégulation associant une hyperthermie majeure (température corporelle au-dessus de 40°C) et des signes neurologiques : troubles du comportement, confusion mentale, délire, déficit focal, troubles de la conscience voire coma. Le début peut être brutal ou précédé d'une altération de l'état général avec présence de prodromes aspécifiques (asthénie, douleurs abdominales, vertiges, vomissements, crampes musculaires, sueurs profuses). L'hyperthermie menace particulièrement les personnes exposées à une chaleur ambiante excessive (ambiance industrielle, travailleur du bâtiment en été, incendie) ou fournissant un travail physique intense et prolongé (hyperthermie maligne d'effort ou coup de chaleur d'exercice) avec une évacuation insuffisante de la chaleur (à cause d'un environnement trop chaud et humide ou de vêtements trop isolants). L'évolution peut être rapidement défavorable en l'absence de traitement, le décès survient dans 30 à 50 % des cas, des séquelles neurologiques définitives peuvent être observées (ataxie, vertiges, troubles sensoriels ou des fonctions supérieures). C'est donc une urgence médicale (appeler le SAMU) qui doit être connue de tous, puisqu'elle met en jeu le pronostic vital [13, 14] ([encadré 3](#)).

Au niveau médical, les mesures d'urgence avant l'hospitalisation sont les suivantes : déshabiller le patient, assurer la liberté des voies aériennes supérieures et l'oxygène, mettre en place une voie veineuse périphérique de calibre suffisant pour la réhydratation

↓ Encadré 3

> COUP DE CHALEUR ET PREMIERS SECOURS (issu du dépliant ED 931 de l'INRS [15])

Coup de chaleur et premiers secours

Fatigue, maux de tête, soif intense, crampes, vertiges, peau sèche, somnolence, confusion, température corporelle supérieure à 39 ° C...

Il s'agit d'une **URGENCE VITALE**.

> Vous devez **IMPÉRATIVEMENT**

- 1- Alerter ou faire alerter le sauveteur secouriste du travail et les secours : 15 (Samu), 18 (sapeurs-pompiers) ou 112 (numéro d'appel européen des services de secours).
- 2- Amener la victime à l'ombre et/ou dans un endroit frais et bien aéré.
- 3- Lui enlever ses vêtements.
- 4- Placer des sacs de glaçons sur les cuisses et les bras de la victime, ou faire couler de l'eau froide sur son corps.
- 5- Si la victime ne présente pas de troubles de conscience : lui donner de l'eau fraîche à boire.
- 6- Si la victime perd connaissance : la mettre en position latérale de sécurité et la surveiller en attendant l'arrivée des secours.

hydro-électrolytique, surveiller les paramètres hémodynamiques et la température. En cas de coma, le patient doit être intubé et ventilé.

FACTEURS AGGRAVANTS

De nombreux facteurs de risques individuels (âges avancés, pathologies chroniques, médicaments) peuvent altérer l'adaptation de l'organisme à la forte chaleur. Une revue de la littérature publiée en 2015 [16] a actualisé les connaissances sur ces facteurs de risque susceptibles d'accentuer les effets néfastes de la chaleur, dont certaines pathologies qui peuvent affecter des travailleurs comme des pathologies neuropsychiques (maladie de Parkinson, troubles mentaux, Alzheimer...), respiratoires, cardiovasculaires (hypertension artérielle, séquelles d'accident vasculaire cérébral...), rénales, endocriniennes (diabète, hyperthyroïdie) ou métaboliques (obésité, dénutrition...).

Travailler dans une ambiance thermique chaude

Les personnes en situation de handicap physique ou psychique peuvent avoir des difficultés à se soustraire seules à la chaleur ou à adopter des comportements préventifs. De même, la consommation d'alcool ou de drogues stimulantes (amphétamines, cocaïne, ecstasy...) peut altérer les perceptions et les réactions des individus. De nombreux médicaments, par leur mécanisme d'action ou par les effets indésirables qu'ils entraînent, sont susceptibles d'aggraver les symptômes liés à la forte chaleur ou de limiter la capacité du corps à se protéger contre la chaleur [17] :

- **médicaments susceptibles d'aggraver le syndrome d'épuisement-déshydratation et le coup de chaleur** : en provoquant des troubles électrolytiques ou de l'hydratation (diurétiques), en altérant la fonction rénale (anti-inflammatoires non stéroïdiens, inhibiteurs de l'enzyme de conversion, antagonistes des récepteurs de l'angiotensine II, certains antibiotiques, antiviraux, antidiabétiques...), en empêchant la perte calorique de l'organisme (neuroleptiques, médicaments à propriétés atropiniques, vasoconstricteurs périphériques...);
- **médicaments susceptibles d'induire une hyperthermie** : neuroleptiques, anti-dépresseurs sérotoninergiques ou non, lithium, médicaments opioïdes, apport trop élevé d'hormones thyroïdiennes... ;
- **médicaments susceptibles d'aggraver indirectement les effets de la chaleur** : en abaissant la pression artérielle, ce qui induit une hypoperfusion cérébrale (tous les anti-hypertenseurs et anti-angoreux), en abaissant la vigilance, ce qui peut altérer les facultés de défense contre la chaleur (médicaments psychotropes).

AUTRES EFFETS SUR LA SANTÉ EN LIEN AVEC DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Les données publiées sur l'altération des performances cognitives lors d'une exposition à la chaleur sont hétérogènes, mais en faveur d'effets sur les processus cognitifs, mnésiques et attentionnels qui surviendraient plus précocement que les pathologies évoquées précédemment. Ces altérations constituent un facteur de risque d'accident du travail par baisse de la vigilance [2], engendrent un ralentissement de la productivité par baisse de concentration et incapacité à accomplir des tâches mentales, et peuvent conduire à une irritabilité et des modifications de l'humeur [4].

La base de données ÉPICEA [18] de l'INRS contient de nombreux exemples d'accidents du travail dans un contexte de forte chaleur. L'étude de 93 cas survenus entre 1983 et 2018 a permis d'identifier sept catégories de situations d'accidents : une chaleur due directement aux conditions météorologiques, une température extérieure induisant de fortes températures dans les locaux de travail (problème de l'isolation des locaux), une chaleur dans les locaux de travail induite par l'activité du lieu et non la température extérieure, une chaleur provenant d'un équipement de travail, des effets résultant de l'association de la chaleur et d'un produit chimique, une chaleur provenant d'un incendie ou de la présence d'un feu, un effet indirect de la chaleur sur le respect des règles de sécurité. Les métiers les plus fréquemment rencontrés sont ceux qualifiés du bâtiment, les manoeuvres du bâtiment et des industries, les conducteurs de machines, les manutentionnaires, les conducteurs de poids lourds. Les lésions

sont diverses et souvent multiples (brûlures, fractures, contusions, intoxications, asphyxies...). L'encadré 4 présente quelques récits d'accidents illustratifs.

D'autres effets des températures extrêmement chaudes sont à craindre sur le lieu de travail : accroissement du risque d'explosion par dégradation des produits chimiques, évaporation des substances inflammables, diminution de l'énergie minimale à fournir pour atteindre le phénomène d'inflammation. Les risques d'intoxication chimique et de réaction allergique sont accrus par l'augmentation, d'une part des concentrations atmosphériques (évaporation accrue ou augmentation de la pulvéulence et de la volatilité des poussières), d'autre part, de l'absorption respiratoire et cutanée *via* les mécanismes d'adaptation physiologique de l'organisme à la chaleur (augmentation de la ventilation pulmonaire et du débit sanguin cutané) [4]. L'élévation durable de la température, notamment dans le contexte du réchauffement climatique, est susceptible d'entraîner une modification des écosystèmes et de leur fonctionnement, qui pourrait modifier les risques biologiques professionnels [4].

L'exposition chronique à la chaleur peut également entraîner des effets sur la reproduction. Les informations de la base de données Reprotox [19] retrouvent que les études chez les souris mâles exposées à un stress thermique au niveau du scrotum ont montré une baisse réversible de la concentration, mobilité et viabilité des spermatozoïdes. La chaleur peut affecter la spermatogénèse et maintenir au chaud les testicules peut réduire la fertilité. Au niveau professionnel, dans une étude, des soudeurs exposés à une élévation de la température

scrotale ont des anomalies dans la qualité du sperme. Cependant, bien que d'après les auteurs ces hommes n'étaient pas exposés à des produits chimiques, les concentrations de chrome urinaire étaient élevées. Il est donc possible que des facteurs autres que la chaleur contribuent à la détérioration de la qualité du sperme [19]. Comme lien indirect des effets de la chaleur sur la fertilité masculine, on retrouve un allongement du délai nécessaire à concevoir chez les femmes dont le partenaire exerce un métier exposant à la chaleur ou qui reste assis longtemps dans un véhicule (position pouvant augmenter la température scrotale).

Il existe également une plausibilité biologique d'un effet de la chaleur sur les issues défavorables de grossesse. Cependant, il n'a pas été retrouvée de publication récente concernant spécifiquement le travail en ambiance chaude. La plupart des études concerne les facteurs climatiques et notamment le réchauffement climatique. Par ailleurs, la Suisse est le seul pays à avoir légiféré : les femmes enceintes qui travaillent à l'intérieur ne doivent pas être exposées à une température de plus de 28 °C [20] (encadré 5 page suivante).

ÉVALUATION DES RISQUES

LE BILAN THERMIQUE DANS UN ENVIRONNEMENT DONNÉ

L'homme doit continuellement maintenir sa température interne constante. Or, sous certaines sollicitations extérieures, selon son activité et ses mécanismes physiologiques, le corps peut produire de la chaleur. Cette chaleur est constamment échangée avec l'environnement et, bien que le corps possède

↓ Encadré 4

> RÉCITS D'ACCIDENTS DU TRAVAIL D'APRÈS LA BASE DE DONNÉES ÉPICEA DE L'INRS : www.inrs.fr/épicea

Un ouvrier intérimaire de 29 ans, depuis trois jours dans l'entreprise, occupe un poste de nuit. Il doit effectuer le brossage d'une tour de pulvérisation de lait, colonne métallique de plusieurs mètres de haut dans laquelle on pulvérise par le sommet du lait dans un contre-courant d'air chaud, afin de fabriquer de la poudre qui est récupérée dans le bas de la tour. La tour a été arrêtée à 21 heures et il y fait 45 °C. Pour y pénétrer, il faut attendre 1h30, cela fait partie des consignes de travail. Par contre, il n'est pas fait allusion à la température. Vers minuit, la température est de 39,4 °C, l'ouvrier décide d'intervenir à partir d'une nacelle qui constitue le sommet de la tour. Il s'équipe d'un harnais de sécurité accroché à la structure du bâtiment et dispose d'un dispositif de protection de travailleur isolé pendant la descente de la nacelle. Quinze minutes après le début du brossage, l'ouvrier ne se sent pas bien et décide de remonter. Il vomit dans les toilettes et va se reposer dans la salle de pause. Après analyse, un problème de ventilation de la tour a été identifié, l'air frais était immédiatement évacué sans traverser la tour et réduire ainsi la température.

Un livreur à vélo de 38 ans, en CDD depuis trois jours, a eu un malaise en fin de tournée, vers 14h, alors qu'il attendait pour prendre une navette. Durant la journée, il avait distribué des documents par une température allant jusqu'à 33 °C, en vélo avec assistance électrique et en doublure avec un autre livreur chargé de le former. Il n'était pas acclimaté à travailler à une température élevée. Il a été transporté au CHU où il est décédé. Un intérimaire de 39 ans a été embauché

dans une entreprise de déménagement par le biais d'une agence d'intérim le jour même de l'accident. Il était dessinateur en bâtiment de métier mais avec le manque de travail il prenait des missions ponctuelles d'intérim. Il avait fait les tests de sécurité lors d'autres missions, mais n'avait aucune formation concernant l'activité de déménagement et les risques liés à l'activité physique. Il était bipolaire et suivait un traitement. Le jour de l'accident, il faisait très chaud et l'activité nécessitait des efforts importants. La matinée s'était bien déroulée, par contre, l'après-midi l'intérimaire s'est senti mal à plusieurs reprises en se plaignant de la chaleur. C'est en voulant soulever un meuble de taille importante qu'il a titubé. Le responsable de l'équipe l'a fait asseoir. Il a été transporté à l'hôpital où il est décédé le lendemain.

Un maçon coffreur intérimaire de 57 ans a quitté son poste de travail à 14h30. Les températures avaient augmenté brutalement depuis la veille, il faisait 37 °C à l'ombre. Il s'est écroulé à environ 100 mètres du lieu de travail. Les salariés d'une entreprise à proximité l'ont relevé et mis en position assise, ont alerté le chef de chantier ainsi que les secours. Le maçon était dans un état semi-conscient, les yeux fixes, ne pouvant plus parler. Il a été pris de convulsions et de vomissements. Son corps était très chaud. Il a été pris en charge par les pompiers dans un délai inférieur à 15 minutes et évacué vers l'hôpital. Son état s'est dégradé au fil des heures à l'hôpital. Il est décédé le lendemain en fin d'après-midi, par hyperthermie avec défaillance multiviscérale.

des mécanismes de régulation sophistiqués, dans certaines conditions d'ambiance thermique et d'activité, des problèmes peuvent apparaître et mettre en danger le salarié.

Cette stabilité de la température corporelle chez l'homme implique un équilibre entre production de

chaleur endogène (qui vient de l'intérieur du corps) et pertes de chaleur vers l'environnement : c'est le bilan thermique. Ce bilan représente la somme de l'ensemble des échanges entre le corps et son environnement en considérant, en outre, son métabolisme (M) et le travail effectué (W). Ce bilan

Travailler dans une ambiance thermique chaude

Encadré 5

> AMBIANCE THERMIQUE CHAUDE ET RISQUE PENDANT LA GROSSESSE

Pendant la grossesse, la température fœtale est supérieure de 0,5 à 1 °C à la température centrale de la mère afin d'assurer un gradient de température permettant la diffusion de la chaleur du fœtus vers la mère pour une meilleure thermorégulation fœtale [21]. Par ailleurs, l'efficacité de la thermolyse (dissipation de chaleur) augmente progressivement en cours de grossesse et permet ainsi à la femme enceinte de dissiper plus de chaleur en fin de grossesse qu'au début de celle-ci [22]. Cette adaptation importante est liée à l'augmentation des volumes sanguins circulants en particulier vers la peau et à l'augmentation de la ventilation pulmonaire et de la sudation. L'exposition maternelle à la chaleur au cours de la grossesse va avoir un impact sur le fœtus, indirectement, par la réduction du flux sanguin placentaire redirigé vers les muscles ou la peau de la mère pour assurer la thermolyse ou, directement, en causant une hyperthermie fœtale [23]. Ceci est d'autant plus risqué pour la santé du fœtus dans les premiers mois de gestation, période durant laquelle les développements du fœtus sont les plus importants, sa thermorégulation

n'est pas encore la plus efficace et enfin la grossesse n'est pas encore connue ou déclarée [23].

Des études chez les animaux en laboratoire ont montré que l'exposition des femelles gravides à des températures élevées peut conduire à une incidence élevée de morts embryonnaires et de malformations [24]. La chaleur est tératogène chez les animaux en début de gestation et entraîne principalement des anomalies neurologiques graves (non-fermeture du tube neural, anencéphalie) ainsi que des malformations de l'œil, du cœur et des reins [20]. Il existe ainsi une plausibilité biologique d'un effet de la chaleur sur les issues défavorables de grossesse.

Les données expérimentales animales sont considérées comme pertinentes pour l'hyperthermie pendant la grossesse [19].

Les seules publications retrouvées concernent l'impact des facteurs climatiques, et notamment du réchauffement climatique, ainsi que les épisodes fébriles chez la mère. Elles ne concernent pas le travail en ambiance chaude.

Plusieurs études ont exploré une possible association entre les épisodes fébriles en début de grossesse et une augmentation du risque d'avortement spontané ou de mort fœtale avec des conclusions contradictoires sur l'existence d'une association. Il semblerait que des épisodes fébriles pendant le premier trimestre de grossesse puissent être associés à une augmentation du risque de malformation chez le fœtus (non fermeture du tube neural, malformations cardiaques, fente palatine) [19].

Dans une méta-analyse récente de 28 études est également retrouvée une association entre la naissance prématurée, le faible poids de naissance, avec l'augmentation de la température ambiante en rapport avec le réchauffement climatique et des épisodes caniculaires [25]. Les températures saisonnières hautes (sup. à 30,7 °C) ont été associées à des accouchements prématurés [26].

Par ailleurs, des anomalies cardiaques congénitales ont été rapportées dans deux études récentes, qui demandent à être confirmées [27, 28], en lien avec les vagues de chaleur estivale.

permet de prévoir s'il y a, ou pas, accumulation de chaleur (Acc) dans le corps.

L'équilibre thermique corporel se définit donc par une équation générale (figure 3) dont les facteurs déterminants sont de trois ordres : les propriétés thermiques du vêtement, la production de chaleur corporelle (métabolisme M et travail W) et les caractéristiques physiques de l'environnement dans lequel se trouve le sujet. En effet, ces caractéristiques de l'environnement vont régir différents mécanismes de transferts thermiques qui vont permettre au corps humain, plus ou moins efficacement, d'échanger de la chaleur de façon

à maintenir son bilan neutre sans accumulation.

Plusieurs types d'échange thermique entre le corps humain et son environnement participent de façon plus ou moins significative à ce bilan : les échanges par convection (C), par conduction (K), par rayonnement (R), par la respiration (Cres et Eres selon qu'il s'agisse d'un échange de chaleur ou de vapeur d'eau, par l'évaporation de la sueur (Ev) (cf. encadré 2 p. 33).

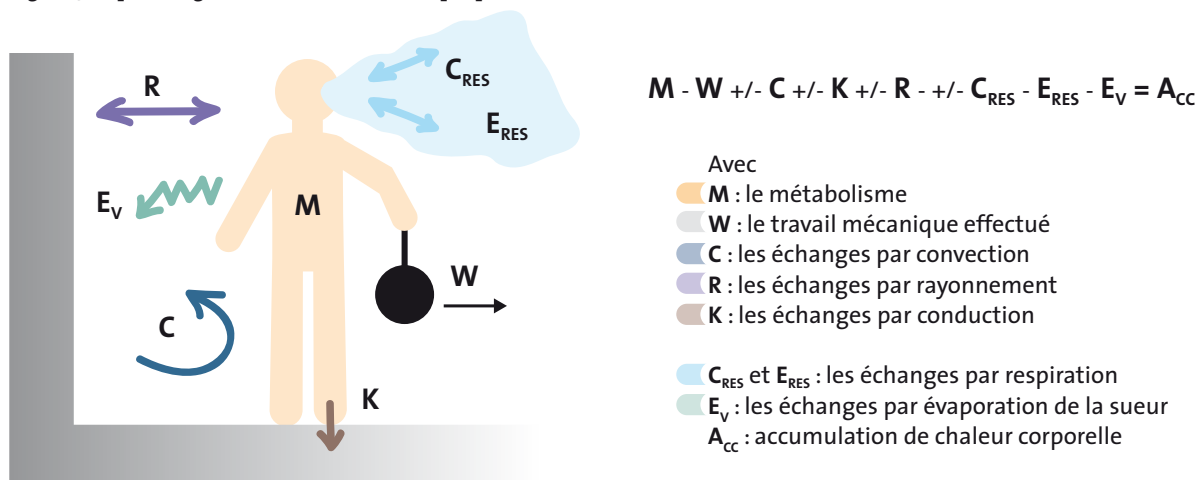
La situation d'un individu dans une ambiance thermique donnée est donc influencée par un grand nombre de paramètres. Ces derniers peuvent être regroupés en trois catégories selon qu'ils

se rattachent à l'environnement (température de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse et humidité relative de l'air), à l'activité du sujet à travers son métabolisme et aux vêtements (tableau I).

L'INDICE DE CONTRAINTE THERMIQUE : ASTREINTE THERMIQUE PRÉVISIBLE (ATP)

Même si les grandeurs clés intervenant dans le bilan du corps sont bien définies, il reste très complexe néanmoins de caractériser l'état de confort ou de contrainte thermique en jugeant de la situation sur l'ensemble de tous ces paramètres à la fois. Pour contourner cette difficulté, des indices, dits de

Figure 3 : Équation générale du bilan thermique pour un individu



↓ Tableau I

> PARAMÈTRES DONT DÉPENDENT LES ÉCHANGES THERMIQUES

	Environnement					Activité	Vêtements	
	Température ambiante	Température radiante	Température de contact	Vitesse de l'air	Humidité de l'air		Isolation thermique	Perméabilité
Métabolisme : M						X		
Travail : W						X		
Respiration : C _{RES} et E _{RES}	X				X	X		
Convection : C	X			X			X	
Conduction : K			X				X	
Rayonnement : R		X					X	
Évaporation : E _V				X	X	X	X	X

« confort thermique » (encadré 6 page suivante) ou de « contrainte thermique », permettent de caractériser la situation d'un individu dans une ambiance donnée en intégrant l'ensemble de ces facteurs. En situation de contrainte chaude, l'indice le plus couramment utilisé est l'indice de sudation requise désigné sous l'acronyme « ATP » pour *astreinte thermique prévisible*, ou « PHS » pour *Predicted Heat Strain*. Il existe de nombreux autres indices dont notamment le WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*), un indice empirique basé sur la mesure de la température humide

et la température du globe noir, longtemps utilisé. Cet indice empirique ne permet pas de quantifier les différents types d'échanges de chaleur, ce qui, par conséquent, ne permet pas de clairement définir les moyens de protection les plus adaptés. C'est pourquoi l'INRS et le réseau des caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT) préconisent l'utilisation de l'indice ATP. La démarche d'évaluation des risques est encadrée par un ensemble normatif (figure 5 page suivante). Cet indice est encadré par la norme NF EN ISO 7933 : 2005 - *Détermination analytique et*

interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible [10] qui spécifie une méthode d'évaluation analytique et d'interprétation de la contrainte thermique subie par un sujet dans un environnement thermique chaud. Elle permet de prédire le débit sudoral et la température corporelle centrale que l'organisme humain met en œuvre en réaction aux conditions de travail à la chaleur. À partir des équations générales du bilan thermique d'un homme placé dans une ambiance thermique spécifiée, l'interprétation de cet

Travailler dans une ambiance thermique chaude

Encadré 6

> LE CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique est la sensation de bien-être perçue lorsqu'on est exposé à une ambiance thermique intérieure, au contraire de la contrainte thermique qui est la résultante sur la physiologie et la santé d'un individu du travail dans un environnement thermiquement dégradé.

Lorsqu'on est proche de la neutralité thermique, pour estimer la gêne perçue par un sujet on va utiliser l'indice de confort « PMV-PPD » issu de la norme NF EN ISO 7730-2006 : *Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local* [29].

Basé sur le bilan du corps dans un environnement donné, la sensation thermique du corps est prédite par deux indices que sont le vote moyen prévisible : VMP (PMV pour *Predicted Mean Vote*) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPI (PPD pour *Predicted Percentage of Dissatisfied*).

Le VMP est un indice qui donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur une échelle à 7 niveaux (tableau II).

Le PPI établit une prévision quantitative du pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement correspondant à un VMP donné, c'est-à-dire que cet indice estime le pourcentage de personne ayant trop chaud ou trop froid dans une ambiance donnée (figure 4).

Il est important de rester vigilant sur le fait que l'inconfort thermique peut être localisé à une

+ 3	Chaud
+ 2	Tiède
+ 1	Légèrement tiède
0	Neutre
- 1	Légèrement frais
- 2	Frais
- 3	Froid

Tableau II : Échelle de sensation thermique [29]

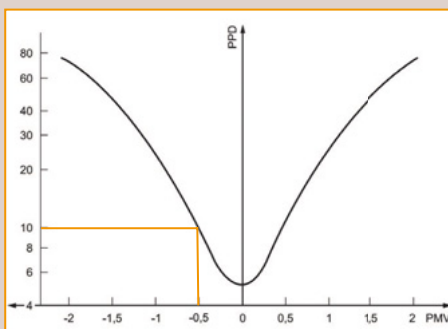
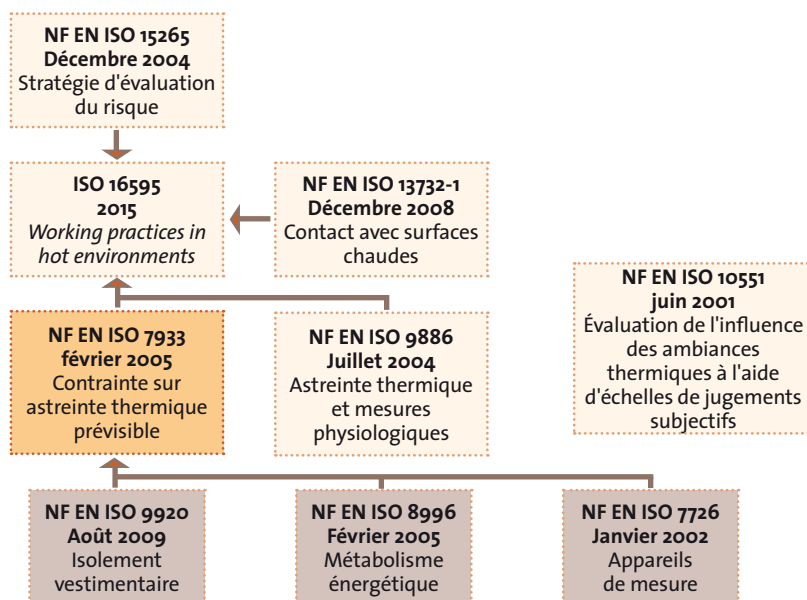


Figure 4 : Expression du pourcentage d'insatisfaits [29] (ici par exemple : pour un PMV de 0,5, environ 10 % des personnes sont insatisfaites)

seule partie du corps, le plus souvent dû à une asymétrie des températures de rayonnement, à la présence de courant d'air ou à la stratification des températures. En plus du bilan thermique et de l'estimation du pourcentage d'insatisfaits renseignant sur le confort global, la présente norme détaille l'ensemble des critères ayant un impact sur le confort localisé.

Figure 5 : Le contexte normatif autour de l'évaluation du risque en ambiance chaude



indice ATP est effectuée sur la base de deux critères de contrainte (la mouillure cutanée maximale, w_{max} [rapport entre la surface corporelle mouillée et la surface corporelle totale du sujet] et le débit sudoral maximal, Sw_{max}) et en fonction de deux limites d'astreinte (la température rectale maximale, $T_{re,max}$, et la perte hydrique maximale, D_{max}). Les valeurs de ces limites d'astreinte sont fonction du degré d'acclimation du sujet et de son accès à l'eau. En cas de déséquilibre du bilan thermique, l'élévation de la température rectale doit être limitée à une valeur maximale, $T_{re,max}$, de manière à réduire au maximum la probabilité de tout effet pathologique. De même, quel que soit le bilan thermique, il convient de limiter la perte hydrique de l'organisme à une valeur maximale, D_{max} , compatible avec le maintien de l'équilibre hydrominéral du corps. Ces deux dernières conditions permettent de définir une limite d'exposition (DLE) dans une situation de contrainte à la chaleur donnée. Lorsque cette DLE est supérieure à 480 min, il n'y a pas lieu de limiter la durée du poste de travail, pour un poste d'une durée de 8h. En revanche, quand la DLE est inférieure à la durée normale du poste de travail, il convient d'organiser des pauses dont la fréquence et la longueur permettent une récupération efficace. La DLE ne doit pas être inférieure à 30 min (faute de quoi une surveillance physiologique directe et individuelle est nécessaire) [10].

Les valeurs limites d'astreintes sont définies pour les deux grandeurs (température rectale maximale et perte hydrique) pour deux seuils distincts : un seuil d'alarme qui est le niveau en deçà duquel un sujet en bon état de santé ne court pas de risque. Un seuil de danger

qui est le niveau au-delà duquel certains sujets, bien qu'ils soient en bon état de santé, peuvent déjà courir un risque. Dans un souci de prévention, les valeurs d'alerte sont considérées comme l'objectif à ne pas dépasser. En ce qui concerne la perte hydrique maximale, pour un sujet ayant un libre accès à l'eau, la valeur retenue est une perte correspondante à 5 % de la masse corporelle. Si le sujet n'a pas accès à l'eau, alors cette valeur est réduite à 3 % de la masse corporelle. En ce qui concerne l'élévation de la température rectale maximale, basée sur des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé, elle ne doit pas dépasser 1 °C. Dans la pratique, et ce dans un souci de prévention, les préventeurs des CARSAT ont adopté des valeurs seuils d'astreinte légèrement plus strictes : soit une élévation de la température centrale de 0,8 °C et une perte hydrique de 3000 g.

LA PLACE DE LA MÉTROLOGIE DANS LA CARACTÉRISATION DE LA CONTRAINTE

Comme cela vient d'être évoqué, l'obtention d'une durée limite d'exposition DLE nécessite la connaissance de l'élévation de la température rectale et de la perte hydrique. Or ces valeurs résultent du calcul du bilan thermique du corps humain. Si la norme NF EN ISO 7933 : 2005 [10] propose une méthode analytique, il n'en reste pas moins nécessaire de mesurer les grandeurs environnementales caractérisant l'environnement du poste de travail et d'estimer la tenue vestimentaire ainsi que le métabolisme du sujet. Ces grandeurs à mesurer ou à estimer sont elles-mêmes réglementées par des normes.

La caractérisation de la contrainte thermique ne peut donc se faire sans la mise en place d'une métro-

logie permettant de caractériser l'environnement du poste de travail. Comme il l'a déjà été mentionné, la mesure de grandeurs physiques dont les températures de l'air et de rayonnement, l'humidité relative de l'air et la vitesse de l'air est nécessaire. Bien qu'encadrées par une norme NF EN ISO 7726-2002 : *Appareils de mesure des grandeurs physiques* [30], ces mesures peuvent présenter des précautions de réalisation ou des subtilités qu'il s'avère judicieux de connaître pour garantir la caractérisation de la situation la plus représentative possible de la réalité de travail.

■ La mesure de la **température de l'air**, désignée également sous le terme température sèche, est réalisée à l'aide de la mesure d'une grandeur physique continue. La gamme de température préconisée pour couvrir les situations de contrainte thermique doit être comprise entre -40 et 200 °C. De façon à ce que le rayonnement thermique des surfaces environnantes n'influe pas la mesure, il est recommandé de placer l'élément sensible (bulbe d'un thermomètre ou soudure d'un thermocouple par exemple) dans un cylindre en métal qui réfléchit le rayonnement incident. Le cylindre « écran » peut être ou non ventilé, cela joue uniquement sur le temps de réponse de l'appareil ; il sera plus rapide dans le cas d'un cylindre ventilé.

■ La **température moyenne de rayonnement**, aussi désignée sous le terme température radiante ou radiative, correspond à la température uniforme d'une sphère noire mate, de grand diamètre, qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel. Pour ce, afin de mesurer la température moyenne de rayonnement, un

globe noir est utilisé. Il s'agit d'un thermocouple ou thermomètre placé dans un globe métallique peint en noir mat d'un diamètre de 15 cm. Cette mesure de température de globe n'est pas tout à fait la température moyenne de rayonnement. En effet, la température moyenne de rayonnement est fonction de la mesure de la température du globe noir, de la température de l'air et de sa vitesse.

Cette mesure simple requiert néanmoins des précautions car la température radiante peut entraîner une erreur importante dans l'estimation de la contrainte. En effet, le fait de placer la mesure de température à l'intérieur d'une sphère nécessite une durée de stabilisation importante d'environ 30 minutes. Sans le respect de cette condition, l'erreur sur la température moyenne de rayonnement serait importante. Il est conseillé que le globe noir soit placé à l'endroit qu'occupent des salariés du poste de travail à caractériser.

■ La **vitesse de l'air** se définit par deux caractéristiques que sont son amplitude et sa direction. Cependant dans la caractérisation de la contrainte, on ne tient compte que de l'amplitude de la vitesse soit sa valeur intrinsèque. Sa mesure peut être réalisée soit par des anémomètres à fil ou boule chaude ou bien par des anémomètres à hélice ; la gamme de mesure conseillée doit couvrir 0,2 à 20 m.s⁻¹. La vitesse de l'air est une grandeur très fluctuante, aussi pour diminuer les effets de cette caractéristique propre il est recommandé d'enregistrer la mesure de la vitesse pendant la durée de stabilisation du globe et de considérer la moyenne des valeurs obtenues. En revanche, connaître les fluctuations de vitesse permet de renseigner ou d'objectiver des

Travailler dans une ambiance thermique chaude

situations d'inconfort local dont peuvent souffrir certains salariés à des postes de travail spécifiques.

■ Enfin la quatrième grandeur physique à mesurer est **l'humidité de l'air**. L'air est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. La quantité de cette vapeur d'eau va permettre de déterminer l'humidité de l'air. La mesure de l'humidité se fait généralement grâce à l'utilisation d'une sonde capacitive de gamme 5 à 95 %.

En parallèle à la mesure des caractéristiques liées à l'environnement, il est nécessaire d'estimer le métabolisme du sujet et son isolement vestimentaire.

Le métabolisme énergétique est la source de chaleur la plus importante fournie au corps, il correspond à la somme du métabolisme de base et de celui d'activité. Le métabolisme de base correspond aux besoins énergétiques incompressibles de l'organisme. Il peut être estimé à partir du taux d'oxygène consommé par le corps à l'identique d'une réaction de combustion, mais sur le terrain cela est difficilement mesurable. Aussi il existe des formules empiriques permettant d'estimer ce métabolisme selon que l'on est un homme ou une femme et ce, en fonction de l'âge, de la taille et du poids du sujet. Au métabolisme de base se rajoute le métabolisme d'activité qui est un métabolisme supplémentaire lié à une activité physique donnée. Cette grandeur est analogue à une puissance et s'exprime en $W.m^{-2}$. La détermination du métabolisme est détaillée dans une norme spécifique NF EN ISO 8996 : 2005 - *Détermination du métabolisme énergétique* [31]. Un exemple de tableau de métabolisme pour des activités usuelles

est fourni en **annexe 1**, mais pour plus de détails, il est conseillé de consulter ladite norme.

De la même façon l'estimation de **l'isolement vestimentaire** est encadrée par une norme spécifique NF EN ISO 9920 : 2009 - *Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire* [32]. Étant donné qu'il est assez fastidieux de calculer l'isolement thermique d'une tenue vestimentaire, ladite norme fournit des tableaux de données de l'isolement vestimentaire Icl pour des tenues complètes ou pour différentes pièces vestimentaires devant être ajoutées pour avoir l'isolement de la tenue complète. Toutes ces données ont été obtenues de façon empirique en employant un mannequin thermique en position debout dans une ambiance où la vitesse de l'air est inférieure à $0,2 m.s^{-1}$. Un exemple de tableau d'isolement vestimentaire pour quelques tenues de travail issu de la norme précédemment citée est fourni en **annexe 2**.

À ce stade, une fois les paramètres de l'environnement mesurés et les caractéristiques liées au sujet estimées, on peut alors utiliser l'indice ATP et estimer s'il conduit ou non à une durée limite d'exposition au poste de travail. Pour faciliter l'estimation de l'astreinte thermique prévisible, le CIMPO, Centre inter-régional de mesures physiques de l'Ouest, a développé un outil, conformément à la norme NF EN ISO 7933 : 2005 [10] que l'ensemble des centres de mesures physiques des CARSAT utilise. Ainsi, les préventeurs des CARSAT peuvent aider à l'évaluation du risque en ambiance thermique dégradée.

DÉTERMINATION DE L'ASTREINTE THERMIQUE AU POSTE DE TRAVAIL : MESURES PHYSIOLOGIQUES ET ÉVALUATIONS SUBJECTIVES

Les mesures d'ambiance thermique évoquées ci-dessus sont des mesures environnementales qui qualifient les conditions dans lesquelles le salarié est amené à travailler, ce sont des mesures de contraintes thermiques. Le corps humain réagit à ces contraintes par des astreintes qui sont des adaptations biologiques, physiologiques et psychologiques. Les mesures physiologiques et les évaluations subjectives permettent de déterminer si le corps humain subit une astreinte thermique.

Dans certains contextes, les indices thermiques environnementaux ne peuvent pas être utilisés.

Il s'agit des situations à risques telles que des expositions brèves à contraintes thermiques élevées, non stables ou lors du port de tenue étanche. Les indices d'exposition utilisés dans les modèles ont des temps de réaction longs et les indices d'isolement thermique vestimentaires ne prennent pas en compte le vêtement étanche. Seuls les indices physiologiques, simples d'utilisation, peuvent déterminer dans ces situations si les salariés sont exposés ou non à une astreinte thermique [33, 34].

Ce chapitre met l'accent sur les astreintes thermiques et leur détermination à travers un exemple de chantier de désamiantage.

Onze salariés masculins sont employés depuis au moins 2 mois dans une entreprise spécialisée dans le désamiantage [34]. Ils brossent l'amiante des murs et du plafond debout au sol ou sur un échafaudage les bras au-dessus des épaules. Ils portent des combinaisons



Figure 6 : Combinaison Tyvek®

sons étanches Tyveck® (Tyvek-Pro. Techs type 5) et un masque à induction d'air. Le masque, les gants et les chaussures sont attachés à la combinaison afin qu'il n'y ait pas de passage d'air (figure 6).

Dans l'espace confiné de la zone de désamiantage, la température de l'air est à 26 ± 1 °C, l'humidité relative à 43 ± 3 % et le travail est estimé modéré avec une dépense énergétique entre 240 - 270 W. Les salariés ont travaillé environ 70 ± 15 min en confinement.

Afin de s'assurer que les salariés travaillent dans de bonnes conditions, il faut déterminer si le port d'une combinaison étanche crée ou non une astreinte thermique au poste de travail à l'aide des indices physiologiques.

Les indices physiologiques sont les mesures de fréquence cardiaque, de température buccale, de sudation et de température cutanée. Les évaluations subjectives comprennent les échelles de Borg et des échelles de jugements spécifiques à l'astreinte thermique.

LA FRÉQUENCE CARDIAQUE

La fréquence cardiaque (FC) est un indice simple, précis, fiable et peu coûteux. Il permet de déterminer la dépense énergétique d'une tâche mais il est utilisé ici en tant qu'indice d'astreinte à la chaleur. Il se caractérise par la mesure de l'augmentation de la fréquence cardiaque de récupération après l'activité selon la notion d'extrapolations cardiaques thermiques (EPCT) proposée par Vogt [7] et reprise par la norme NF EN ISO 9886 [5] et Meyer [33]. En effet, au cours de l'activité, la FC s'élève du fait de la dépense énergétique et de la charge thermique et permet l'augmentation du débit sanguin nécessaire au transfert de la cha-

leur accumulée dans le noyau vers la peau où elle sera dissipée. À l'arrêt, la FC diminue rapidement due à la récupération métabolique qui tend à disparaître en 3 min alors que la récupération thermique due à la baisse progressive de la température corporelle est plus lente. De ce constat, le recueil de la FC et l'indice EPCT permettent de surveiller les salariés exposés à la chaleur et de déterminer si une astreinte thermique est subie.

Les EPCT correspondent à la moyenne des FC de récupération des 3^e (R3), 4^e (R4) et 5^e (R5) minutes après l'activité à laquelle est soustraite la FC de repos (FCo). La FCo est la moyenne des FC enregistrées pendant 5 min avant l'acti-

Figure 7 : Phases d'activité à étudier pour calculer les extrapolations cardiaques thermiques (EPCT) [33]

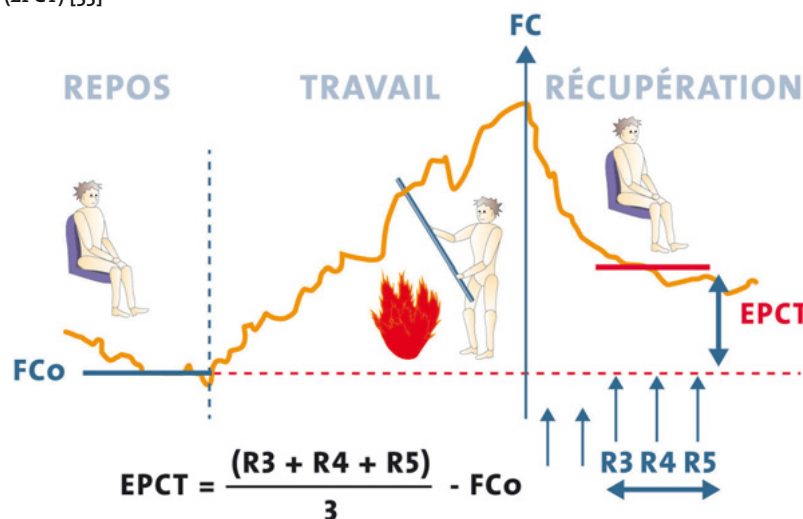
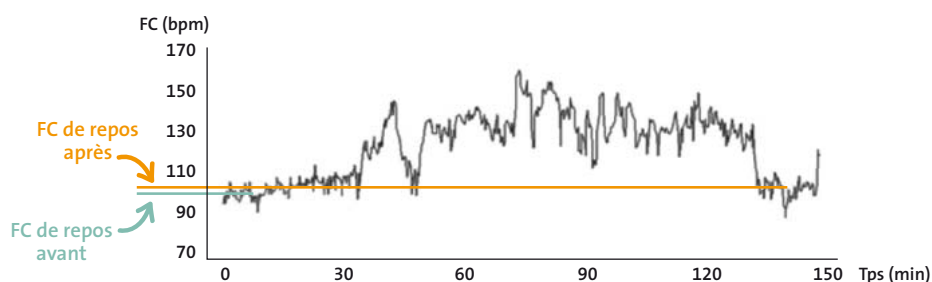


Figure 8 : Tracé de fréquence cardiaque (FC) d'un salarié lors de son activité de désamiantage



Travailler dans une ambiance thermique chaude

té en condition environnementale neutre, le salarié étant assis sans parler (figure 7). **Afin d'éviter une astreinte thermique, les EPCT ne doivent pas dépasser 30 bpm** [5, 7]. La figure 8 représente la courbe de FC d'un salarié lors de son activité de désamiantage.

La valeur moyenne des EPCT des 11 salariés est de 7 ± 8 bpm. La valeur limite de 30 bpm n'est pas atteinte aussi la FC ne montre pas d'astreinte thermique subie par les salariés.

LA TEMPÉRATURE BUCCALE

La température centrale est un bon indicateur d'astreinte à la chaleur mais il est difficile à obtenir car sa mesure n'est pas unique. La température buccale, facilement enregistrable, est une mesure corporelle suffisamment représentative de la température centrale pour être préconisée en situation de travail. Cette température est mesurée à l'aide d'un capteur avec une thermistance à usage unique placée sous la langue. Cette mesure est prise pendant les 5 minutes des phases de repos avant et après l'exposition. Elle doit être enregistrée bouche fermée afin d'éviter les échanges thermiques par convection et évaporation à la surface des muqueuses buccales qui abaisserait la température.

L'indice d'astreinte à la chaleur est la variation de la température buccale entre avant et après exposition. **La valeur seuil de différence de température buccale à ne pas dépasser est de 1 °C.** Au-delà de cette valeur, il est considéré que le salarié subit une astreinte thermique [5].

Dans l'exemple présenté, il n'y a pas d'astreinte à la chaleur sur le chantier de désamiantage lors du port de la combinaison étanche avec une valeur moyenne de va-

riation de température buccale de $0,33 \pm 0,32$ °C.

LA SUDATION

Le contrôle de la perte sudorale est nécessaire lors d'expositions suffisamment longues (environ 1h) lorsque l'activité physique est importante pour que le mécanisme des glandes sudoripares situées au niveau de la peau puisse s'enclencher.

Les valeurs limites préconisées en perte d'eau à ne pas dépasser sont de 5 % de perte de la masse corporelle si la personne a la possibilité de boire et de 3 % si ce n'est pas possible (NF EN ISO 7933, 2005 [10]).

La pesée lors du chantier de désamiantage s'est réalisée avant et après l'exposition, en ambiance tempérée, sans l'équipement de protection, sur une balance de précision +/- 50 g. Les pertes sudorales lors du port de la combinaison étanche n'ont pas dépassé les 3 % de perte de masse corporelle pour les 11 salariés dû à un environnement thermique et une charge physique modérés. La combinaison étanche favorise l'accumulation de vapeur d'eau pour arriver à un point de saturation qui limite la sécrétion de sueur et empêche sa vaporisation. La sueur aura tendance à ruisseler, ce qui limite la perte de chaleur et contribue à l'apparition d'une astreinte à la chaleur.

LA TEMPÉRATURE CUTANÉE

Lors d'interventions très brèves, la température centrale n'a pas le temps de varier et la sudation de s'enclencher. Aussi, la température cutanée, qui varie rapidement, est le paramètre à étudier bien qu'elle ne permette pas d'évaluer l'astreinte thermique [5]. En effet, elle est considérée comme un critère de confort thermique mais qui n'est pas à né-

gliger. De fait, la notion d'inconfort est importante et elle 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.

Les températures à la surface du corps sont très variées et sont influencées par les échanges thermiques par conduction, convection, rayonnement et évaporation ainsi que par les variations du débit sanguin. Il convient de mesurer des températures locales qui, par pondération, permettent d'obtenir une température cutanée moyenne. En ambiance chaude et très chaude, quatre points de mesurage sont suffisants et se situent au niveau de la nuque, de l'omoplate droite, de la main gauche et du tibia droit selon les recommandations de la norme NF EN ISO 9886 [5].

Dans les conditions du chantier de désamiantage, la température cutanée moyenne recueillie pour les 11 salariés de $33,8 \pm 0,88$ °C se situe dans la plage de confort (32 - 34 °C). Cependant, certaines situations ont montré une élévation de la température cutanée proche d'un inconfort thermique (seuil de douleur à 43 °C) ce qui doit être pris en compte.

DONNÉES SUBJECTIVES

En complément des données objectives mesurées, les échelles de jugements subjectifs sont utilisées pour quantifier les astreintes physiques, thermiques et le confort dans des situations où s'additionnent parfois aux conditions chaudes des charges physiques élevées. Dans ces conditions, une évaluation subjective de la charge physique est nécessaire telle que l'emploi des échelles de Borg. L'utilisation conjointe des données objectives et

subjectives renforcent l'analyse des risques.

De nombreuses échelles de quantification existent mais les échelles de Borg [35, 36] font l'objet d'un consensus d'efficacité et sont utilisées dans de nombreux domaines. Ces échelles permettent une évaluation de la charge physique de travail. Elles sont de 2 types, une évaluation globale avec l'échelle RPE (*Rating of Perceived Exertion*) [36] qui s'appuie sur l'étude de la fréquence cardiaque et une échelle locale CR10 (*Categorical Rating 10*) [36] en lien avec la force générée qui interroge la perception de l'effort (figure 9).

Dans le chantier de désamiantage, les salariés ont coté l'astreinte physique globale à 13 selon l'échelle RPE de Borg, ce qui correspond à un effort physique un peu dur. Sur ce chantier de désamiantage, les tâches sollicitent fortement les membres supérieurs et le dos, ce qui peut provoquer des contraintes musculaires locales élevées.

Des échelles de jugements subjectifs permettent de quantifier les astreintes thermiques et le confort [37] (figure 10). Dans l'étude de désamiantage, des échelles de ce type ont été présentées aux salariés afin d'évaluer le confort, le rafraîchissement, la solidité, l'encombrement et les difficultés respiratoires induites par les protections individuelles. Les résultats montrent que les salariés sont peu gênés par les appareils de protection respiratoire portés avec la tenue Tyvek®. Cependant, ils considèrent que cette combinaison étanche est peu confortable, peu rafraîchissante, peu robuste, mais aussi en point positif, peu encombrante. Les aspects négatifs du port de cette tenue peuvent être expliqués par l'humidité retenue dans la combinaison.

Figure 9 : Échelles de Borg [36]

Borg RPE (<i>Rating of Perceived Exertion</i>)	Borg CR10 (<i>Categorical Rating 10</i>)
6 rien	0 rien
7 extrêmement faible	0,5 très très faible
8 très faible	1 très faible
9	2 faible
10	3 modéré
11 faible	4 un peu dur
12	5 dur
13 un peu dur	6
14	7 très dur
15 dur	8
16	9
17 très dur	10 très très dur
18	● maximal
19 extrêmement dur	
20 effort maximal	

Figure 10 : Exemple d'échelles de jugements subjectifs pour quantifier l'astreinte thermique [37]

Ma respiration est :	Je transpire :
1 / tout à fait normale	0 / pas du tout
2 /	1 / à peine
3 / je suis un peu gêné	2 / nettement
4 /	3 / énormément
5 / je suis très gêné	Cet équipement vous a-t-il gêné dans cette tâche ? :
6 /	1 / pas du tout
7 / je manque d'air	2 / un peu
Ma peau est :	3 / moyennement
1 / sèche	4 / beaucoup
2 / un peu mouillée	5 / énormément
3 / mouillée	
4 / très mouillée	
5 / trempée	

En conclusion, les différentes mesures physiologiques et les évaluations subjectives permettent de déterminer si une situation risque de provoquer une astreinte thermique. Ces situations sont spécifiques dans le sens où les indices thermiques environnementaux ne peuvent pas être appliqués (environnement non stable, bref et intense, port de tenue étanche).

PRÉVENTION

Les mesures de prévention s'inscrivent dans la perspective d'une démarche globale, conçue le plus en amont possible, dès la conception des locaux, en passant par des mesures d'organisation du travail, d'information et de formation, particulièrement nécessaires ici en raison de l'importance des aspects comportementaux.

Dans une situation de contrainte à la chaleur on peut distinguer deux grands types d'action de prévention qui doivent être menées en parallèle : les actions techniques qui visent à agir sur les paramètres régissant l'équilibre thermique du corps dans son environnement et les actions organisationnelles qui elles, visent à agir sur la situation de travail.

LES ACTIONS TECHNIQUES

Les actions techniques vont directement impacter les différents paramètres intervenant dans le bilan thermique du corps. Pour ce qui est des paramètres liés à l'environnement : température de l'air, vitesse, humidité et température de rayonnement, on parle d'actions techniques générales. Au contraire, lorsqu'il s'agit d'impacter le métabolisme et l'isolement vestimentaire qui sont des paramètres propres au sujet, on parle d'actions techniques circonstanciées.

LES ACTIONS TECHNIQUES GÉNÉRALES

Agir sur la température de l'air, sa vitesse et son humidité

Les actions sur ces trois grandeurs peuvent, selon les situations de travail rencontrées, être conduites en utilisant différents leviers.

- Assurer une ventilation efficace

Travailler dans une ambiance thermique chaude

pour éviter toute accumulation de chaleur dans les locaux ou au poste de travail. Une ventilation efficace n'est pas qu'une question de capacité globale d'installation, c'est-à-dire un débit global mis en œuvre. Il est primordial de veiller à un ensemble de caractéristiques propres au réseau de ventilation pour que ce dernier soit optimal : bien définir les localisations des entrées et sorties d'air en fonction de la configuration du bâtiment et des sources de chaleur, définir le type de ventilation le plus adapté (balayage, induction, déplacement basse vitesse...), penser, si des sources de chaleur ponctuelles sont présentes, à combiner ventilation générale et captage à la source, entretenir et vérifier régulièrement le réseau de ventilation pour s'assurer du maintien de ses caractéristiques initiales [38].

■ Limiter les apports de chaleur venant de l'extérieur en agissant sur le bâtiment. En cas de fort rayonnement solaire (période de canicule ou situation géographique spécifique du bâtiment) une solution est de limiter les apports de chaleur du bâtiment qui viennent s'ajouter à ceux des procédés. L'isolation du toit et/ou des murs, l'utilisation d'écrans, de pare-soleil ou encore l'emploi de peintures claires, lisses ou de parois de verre réfléchissantes peuvent être des solutions envisagées. À noter que ces actions, agissant directement sur le bâtiment, sont généralement réfléchies et mises en œuvre dès la conception des locaux.

■ Recourir à la climatisation. La climatisation, ou conditionnement d'air, est un moyen de maintenir une température et une humidité relative de l'air à un niveau donné. Elle se distingue de la ventilation qui est le moyen de renouveler l'air d'un local et qui répond à des exigences sanitaires et hygiéniques. Différents systèmes sont dispo-

nibles comme la climatisation à détente directe (l'air est refroidi grâce à un évaporateur directement placé dans le local à climatiser), la climatisation tout air (basée sur le principe d'un traitement centralisé de l'air puis d'une redistribution vers plusieurs locaux) ou la climatisation toute eau (basée sur l'utilisation de terminaux types ventilo-convecteurs dans chaque pièce). La climatisation n'est pas uniquement destinée aux bâtiments mais peut être envisagée également dans des postes de travail spécifiques comme par exemple les engins de chantier, les cabines de contrôle... Le rafraîchissement adiabatique (sans échange avec l'extérieur), différent d'une climatisation, peut être un recours économique quand il est possible de le mettre en œuvre. Ce procédé permet un refroidissement de l'air traversant un filet d'eau. Au contact de l'air chaud, une partie de l'eau se vaporise, cette vaporisation consomme de l'énergie provenant du flux d'air, qui se refroidit.

■ Aménager des cabines de protection, par exemple dans les fonderies pour protéger les opérateurs pendant les coulées.

En ce qui concerne spécifiquement la vitesse de l'air, on précise que l'augmenter, notamment par l'utilisation de ventilateurs, est généralement bénéfique sur les échanges thermiques (augmentation sensible des échanges par convection) à condition que la température de l'air ne dépasse pas 34 à 35 °C. En effet, au-delà de ce niveau de température, la température de l'air peut être plus chaude que la température de la peau, ce qui peut conduire à un apport de chaleur au salarié exposé. En ce qui concerne spécifiquement l'humidité, il est recommandé de veiller à canaliser et évacuer l'humidité à l'extérieur du bâtiment en utilisant des systèmes de captage de vapeur. Il est possible également

d'avoir recours à des humidificateurs ou des desséchants d'air selon le procédé pour rester dans une plage de confort située entre 40 et 70 % d'humidité relative.

Agir sur la température de rayonnement

Le rayonnement dans la contrainte thermique provient essentiellement (à l'exception du rayonnement solaire concernant les travailleurs en extérieur) de surfaces ou objets très chauds : surfaces de fours, pièces chauffées, coulées de métal ou verre en fusion, cuisines ou blanchisseries industrielles... Les actions pour limiter le rayonnement de ces surfaces peuvent être de :

- mettre en œuvre des écrans entre la source et l'opérateur. Il pourra, selon le procédé, s'agir d'écrans textiles ignifugés, d'écrans PVC pour isoler des zones spécifiquement chaudes, comme une zone de cuisson industrielle par exemple, ou d'écrans métalliques. Pour ces derniers, il peut être mis en œuvre des écrans à double-paroi plutôt que simple paroi. En effet ils sont plus efficaces que de simples tôles ou grillages, car la couche d'air présente entre les deux parois métalliques permet d'évacuer une partie des calories par convection ;
- isoler les pièces chaudes de façon à réduire leur température de surface et donc à la fois leur rayonnement thermique et leur contribution à l'augmentation de la température de l'air ;
- éloigner des sources de chaleur, lorsque cela est possible, les commandes pour l'opérateur.

LES ACTIONS TECHNIQUES CIRCONSTANCIÉES

Agir sur le métabolisme

Le métabolisme représentant l'apport de chaleur le plus important

au corps, il convient de le limiter lorsque cela est possible et donc de :

- modifier voire mécaniser certaines tâches. Par exemple, utiliser systématiquement les aides mécaniques à la manutention si la tâche demandée allie conditions de chaleur et manutention ;
- réduire les efforts physiques et adapter le rythme de travail selon la tolérance à la chaleur des salariés ;
- prendre en compte la période d'acclimatation nécessaire (au minimum sept jours d'exposition régulière à la chaleur), en particulier pour les intérimaires, les nouveaux embauchés, les salariés de retour après une absence.

Agir sur la tenue vestimentaire

Il convient de fournir des vêtements légers, adaptés à chaque salarié et à la tâche à effectuer, permettant une bonne régulation thermique du corps et l'évacuation de la sueur. Pour les travaux d'extérieur, il s'agira d'un couvre-chef protégeant la nuque, de vêtements amples et aérés (inserts en filet aux aisselles, soufflets, œillets de ventilation), de couleur claire, des lunettes filtrant le soleil. En cas de rayonnement solaire, de la crème protectrice et des vêtements réfléchissants sont préconisés.

Le développement actuel de textiles intelligents ouvre des perspectives prometteuses en matière de thermorégulation [39]. En effet, la mesure de la température est un besoin critique pour alerter l'utilisateur lorsque sa température corporelle est excessive, en attendant que des systèmes thermorégulants performants puissent prendre le relais pour maintenir constamment des conditions sécuritaires. Sont déjà disponibles plusieurs articles commerciaux comme des *tee-shirts* changeant de couleur ou intégrant des capteurs de tempéra-

ture, développés en première intention pour des usages sportifs, qui peuvent servir d'indicateur quand l'activité devient trop intense ou lorsqu'il y a un risque de coup de chaleur. Ces textiles de détection thermique doivent encore évoluer pour devenir plus faciles d'entretien et inclure un composant actif pour la thermorégulation.

LES ACTIONS ORGANISATIONNELLES

L'optimisation des mesures organisationnelles repose sur l'information et la formation des salariés. Les zones concernées doivent être signalées : « *entrée dans une zone chaude extrême* », « *contact possible avec des surfaces chaudes* »... La température ambiante des lieux de travail doit être surveillée. Les recommandations et gestes de premiers secours doivent être affichés. Certaines situations de travail imposent une vigilance particulière : local ou espace clos, contact avec des surfaces métalliques ou réfléchissantes, travailleur isolé...

Lors de périodes de canicule, il est indispensable de vérifier quotidiennement les conditions météorologiques, pour évaluer les risques au jour le jour, et prendre des mesures adaptées aux tâches et aux lieux de travail : limiter ou reporter le travail physique pour réduire la production de chaleur métabolique, mettre en œuvre des adaptations techniques pour limiter les effets de la chaleur (abris en extérieur, ventilateur, brumisateurs, volets, stores), prévoir des sources d'eau potable à proximité des postes de travail et des aires de repos ombragées ou climatisées, informer les salariés sur les risques liés à la chaleur, les signes d'alerte du coup de chaleur et les mesures de premier secours. Dans les bureaux, il est préconisé d'arrêter les imprimantes, photocopieurs

et toute autre source additionnelle de chaleur (poste informatique ou lampe non utilisée).

Certaines mesures organisationnelles peuvent contribuer à la réduction des risques :

- prendre en compte la période d'acclimatation ;
- augmenter la fréquence des pauses de récupération, dans des lieux frais ;
- limiter le temps d'exposition du salarié à la chaleur en effectuant des rotations de personnel si possible ;
- aménager les horaires de travail en période de fortes chaleurs en favorisant les heures les moins chaudes de la journée ;
- éviter le travail isolé, pour permettre une surveillance mutuelle des salariés et une intervention rapide si besoin ;
- permettre au salarié d'adopter son propre rythme de travail pour réduire sa contrainte thermique.

LES MESURES INDIVIDUELLES

Des mesures comportementales sont susceptibles elles-aussi de diminuer les risques liés à une ambiance thermique chaude : les salariés doivent en être informés. Il s'agit notamment de :

- porter des vêtements amples, légers, de couleur claire, favorisant l'évaporation de la sueur, et se protéger la tête du soleil ;
- boire régulièrement de l'eau fraîche, même en l'absence de soif ;
- éviter les repas copieux, les boissons alcoolisées, le tabac et les substances psychoactives.

Les salariés doivent être informés de l'impératif de cesser immédiatement toute activité si des symptômes de malaise (fatigue, nausées, étourdissement, maux de tête) apparaissent et de le signaler sans tarder. Toute conduite de véhicule doit être proscrite dans ce cas.

Travailler dans une ambiance thermique chaude

Les équipements de protection individuelle (EPI)

Conformes à leurs normes respectives et choisis en fonction de l'analyse des risques, les EPI doivent être confortables en ambiance chaude de façon à ne pas être une source supplémentaire de contraintes.

LE RÔLE DU SERVICE DE SANTÉ AU TRAVAIL

Le service de santé au travail (SST) conseille l'employeur, les salariés et leurs représentants sur les mesures nécessaires, afin d'éviter ou de diminuer les risques professionnels, notamment en participant à l'évaluation des risques dans le cadre de l'élaboration de la fiche d'entreprise et dans le cadre de son action sur le milieu de travail, au service de la prévention et du maintien dans l'emploi des travailleurs, qu'il conduit avec les autres membres de l'équipe pluridisciplinaire.

Il participera ainsi à la mise en place des mesures de prévention en lien avec l'employeur et le comité social et économique (CSE), ainsi qu'à l'information des salariés et notamment des salariés les plus à risque (antécédents médicaux, prise de médicaments, femmes enceintes, travailleurs vieillissants, intérimaires...).

Il a un rôle particulier dans l'organisation des secours en lien avec les structures d'urgences locales.

RÉGLEMENTATION

Aucune indication de température maximale au-delà de laquelle il est dangereux ou interdit de travailler n'est donnée dans le Code du travail. Cependant, certaines dispositions relatives aux ambiances particulières de travail répondent au souci d'assurer des conditions de travail adaptées en cas de fortes chaleurs.

DISPOSITIONS GÉNÉRALES

Conformément aux dispositions du Code du travail, l'employeur est tenu de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs (art. L. 4121-1 et suivants du Code du travail), en application des principes généraux de prévention. Il doit notamment prendre en considération les ambiances thermiques, dont le risque de fortes chaleurs, dans le cadre de sa démarche d'évaluation des risques, de l'élaboration du document unique d'évaluation des risques (DUER) et de la mise en œuvre d'un plan d'actions prévoyant des mesures de prévention. Certaines dispositions réglementaires plus ciblées, consacrées à l'aménagement et à l'aération des locaux, aux ambiances particulières de travail et à la distribution de boissons, répondent en outre au souci d'assurer des conditions de travail satisfaisantes, y compris dans des ambiances de travail où les températures sont élevées :

- dans les locaux fermés, l'employeur est tenu de renouveler l'air des locaux de travail en évitant les élévations exagérées de températures (art. R. 4222-1 du Code du travail) ;
- dans les locaux fermés à pollution non spécifique (locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine), le renouvellement de l'air doit avoir lieu soit par ventilation mécanique, soit par ventilation naturelle permanente (art. R. 4222-4 du Code du travail) ;
- l'employeur doit en outre mettre à disposition des salariés de l'eau potable et fraîche pour la boisson (art. R. 4225-2 et suivants du Code du travail) ;
- l'employeur doit aménager les postes de travail extérieurs de telle sorte que les travailleurs soient protégés contre les conditions

atmosphériques (art. R. 4225-1 du Code du travail).

RÔLE DU MÉDECIN DU TRAVAIL

Les dispositions prises pour assurer la protection des salariés contre les températures extrêmes nécessitent l'avis du médecin du travail et du CSE.

Le médecin du travail pourra par ailleurs proposer des mesures pour améliorer les conditions de vie et de travail dans l'entreprise, adapter les postes et les rythmes de travail à la santé des salariés.

Il pourra également proposer par écrit et après échange avec le salarié et l'employeur, des mesures individuelles d'aménagement, d'adaptation ou de transformation du poste de travail ou des mesures d'aménagement du temps de travail justifiées par des considérations relatives notamment à l'âge ou à l'état de santé physique et mental du travailleur (art. L. 4624-3 à L. 4624-6 du Code du travail).

DROIT DE RETRAIT DU SALARIÉ

S'agissant de l'exercice du droit de retrait des salariés (art. L. 4131-1 à L. 4131-4 du Code du travail), il est rappelé que celui-ci s'applique strictement aux situations de danger grave et imminent. En effet, si un salarié se sent menacé par un risque grave de blessure ou d'accident, en raison de sa situation de travail, il peut alors interrompre ses activités et quitter son poste de travail, ou bien refuser de s'y installer, tant que son employeur n'a pas mis en place les mesures de prévention adaptées.

Ce dispositif, s'apprécie subjectivement du point de vue du salarié. En effet, le salarié n'a pas à prouver qu'il y a bien un danger, mais doit se sentir menacé par les températures extrêmes par exemple de son poste de travail. C'est bien au salarié d'apprécier au regard de ses

compétences, de ses connaissances et de son expérience si la situation présente pour lui un danger « grave » et « imminent » pour sa vie ou sa santé.

Dans les situations de travail à la chaleur, une évaluation des risques et la mise en place de mesures de prévention appropriées permet toutefois en principe de limiter les situations de danger.

DISPOSITIONS SPÉCIFIQUES

CHANTIERS DU BTP

Les travailleurs doivent disposer soit d'un local permettant leur accueil dans des conditions de nature à préserver leur santé et leur sécurité en cas de survenance de conditions climatiques susceptibles d'y porter atteinte, soit d'aménagements de chantiers les garantissant dans des conditions équivalentes (art. R. 4534-142-1 du Code du travail).

Les employeurs du Bâtiment et des travaux publics (BTP) sont tenus de mettre à la disposition des travailleurs au moins 3 litres d'eau, par jour et par travailleur (article R. 4534-143 du Code du travail).

Pour certaines activités, l'entrepreneur peut, sous certaines conditions strictes, décider d'arrêter le travail pour intempéries (art. L. 5424-9 du Code du travail).

JEUNES TRAVAILLEURS

Les jeunes travailleurs de moins de 18 ans ne peuvent être affectés qu'à des travaux qui ne sont pas susceptibles de porter atteinte à leur sécurité, à leur santé ou à leur développement (art. L. 4153-8 du Code du travail). À cet égard, le code du travail prévoit l'interdiction de les affecter à des travaux les exposant à une température extrême susceptible de nuire à la santé (art. D. 4153-36 du Code du travail).

DISPOSITIONS APPLICABLES AUX MAÎTRES D'OUVRAGE

Le maître d'ouvrage doit se conformer à certaines règles relatives à l'aménagement des locaux de travail. Ainsi, les équipements et caractéristiques des locaux de travail doivent être conçus de manière à permettre l'adaptation de la température à l'organisme humain pendant le temps de travail, compte tenu des méthodes de travail et des contraintes physiques supportées par les travailleurs.

Ces dispositions ne font pas obstacle à celles du Code de la construction et de l'habitation relatives aux caractéristiques thermiques des bâtiments autres que d'habitation (art. R. 4213-7 à R. 4213-9 du Code du travail).

DISPOSITIF « PÉNIBILITÉ »

Les températures extrêmes font partie des facteurs de risques professionnels concernés par le dispositif pénibilité. Les salariés exposés à plus de 900 heures par an à une température au moins égale à 30 degrés sont ainsi susceptibles d'acquérir des points crédités sur le compte personnel de prévention (C2P) et de bénéficier de mesures de compensation. La température s'entend alors des températures liées à l'exercice de l'activité elle-même ; les températures extérieures n'étant pas prises en considération dans le cadre de ce dispositif (art. D. 4163-2 du Code du travail).

risque professionnel, elles nécessitent une démarche d'évaluation qui passe, notamment, par l'estimation de l'astreinte thermique prévisible (indice ATP). Dans certains contextes (expositions brèves à des contraintes thermiques élevées, non stables ou lors du port de tenues spécifiques comme les tenues étanches par exemple), cet indice ATP ne peut pas être utilisé ; il faut alors avoir recours aux indices physiologiques, simples d'utilisation, qui permettent de déterminer dans ces situations de travail très particulières si les salariés sont exposés ou non à une astreinte thermique. Les mesures de prévention s'inscrivent dans une démarche globale, conçue le plus en amont possible, dès la conception des locaux, en passant par des mesures d'organisation du travail, d'information et de formation, particulièrement importantes.

Le service de santé au travail participera à la mise en place des mesures de prévention en lien avec l'employeur et le CSE, à l'information des salariés et notamment de ceux les plus à risque (antécédents médicaux, prise de médicaments, femmes enceintes, travailleurs vieillissants, intérimaires...), ainsi qu'à l'organisation des secours.

CONCLUSION

Les ambiances de travail chaudes d'origine climatique ou liées aux procédés de travail peuvent être à l'origine d'effets sur la santé potentiellement graves et d'accidents du travail. Comme tout



Travailler dans une ambiance thermique chaude

POINTS À RETENIR

- De nombreux salariés sont exposés à de fortes chaleurs au travail, qui peuvent avoir un impact rapide sur l'état de santé.
- Les mécanismes physiologiques de thermorégulation permettent à l'organisme de conserver une température constante.
- Ces mécanismes peuvent être débordés dans certaines situations, qu'il faut identifier en réalisant une évaluation des risques.
- L'évaluation des risques se base sur le bilan thermique du corps dans un environnement thermique stable et pérenne. Dans les autres situations, elle se base sur des mesures physiologiques et subjectives.
- En fonction de l'évaluation des risques, diverses mesures de prévention sont possibles, de la conception des locaux à l'organisation du travail, en passant par des mesures techniques, l'information et la formation des salariés.
- Aucune indication de température maximale au-delà de laquelle il est dangereux ou interdit de travailler n'est donnée dans le Code du travail : il est de la responsabilité de l'employeur de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des salariés exposés à des ambiances thermiques chaudes.
- Le coup de chaleur est une urgence médicale qui doit être connue de tous et déclencher immédiatement les secours

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | PASCAL M, WAGNER V, CORSO M, LAADI K ET AL. - Heat and cold related-mortality in 18 French cities. *Environ Int.* 2018 ; 121 (Pt 1) : 189-98.
- 2 | Canicules : effets sur la mortalité en France métropolitaine de 1970 à 2013, et focus sur les étés 2006 et 2015. Santé Publique France, 2019 (<https://santepubliquefrance.fr/Actualites/Canicules-effets-sur-la-mortalite-en-France-metropolitaine-de-1970-a-2013-et-focus-sur-les-etes-2006-et-2015>).
- 3 | Recommandations sanitaires du Plan national canicule 2014. Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP), 2014 (www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=418).
- 4 | Évaluation des risques induits par le changement climatique sur la santé des travailleurs. Avis de l'ANSES. Rapport d'expertise collective. Maisons-Alfort : ANSES ; 2018 : 262 p.
- 5 | 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.
- 6 | Health factors involved in working under conditions of heat stress. Report of a WHO scientific group on Health Factors Involved in Working under Conditions of Heat Stress & World Health Organization (meeting held in Geneva from 29 August to 4 September 1967). Technical report series 412. World Health Organization (WHO), 1969 (<https://apps.who.int/iris/handle/10665/40716>).
- 7 | VOGT JJ, METZ B - Ambiances thermiques. In: Scherrer J - Précis de physiologie du travail. Notions d'ergonomie. 2^e édition. Paris : Éditions Masson ; 1992 : 217-63, 585 p.
- 8 | MAYER E - Objective criteria for thermal comfort. *Build Environ.* 1993 ; 28 (4) : 399-403.
- 9 | CUDDY JS, HAILES WS, RUBY BC - A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *J Therm Biol.* 2014 ; 43 : 7-12.
- 10 | 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.
- 11 | MAIRIAUX P, MALCHAIRE J - Le travail en ambiance chaude. Collection de monographies de médecine du travail 7. Paris : Masson ; 1990 : 172 p.
- 12 | Pathologies liées à la chaleur. *Rev Prat Méd Gén.* 2011 ; 863 : 457-58.
- 13 | SALATHÉ C, LIAUDET L, PELLATON C, VALLOTON L ET AL. - Le coup de chaleur d'exercice. *Rev Méd Suisse.* 2012 ; 8 : 2395-99.

- 14 | Hyperthermie maligne d'effort. Bonnes pratiques en cas d'urgence. Orphanet, 2017 (www.orpha.net/data/patho/Emg/Int/fr/HyperthermieMaligneExercice_FR_fr_EMG_ORPHA466650.pdf).
- 15 | Travail et chaleur d'été. Édition INRS ED 931. Paris : INRS ; 2004 : 8 p.
- 16 | LAAIDI K, UNG A, PASCAL M, BEAUDEAU P - Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque. *Bull Epidémiol Hebd.* 2015 ; 5 : 76-82.
- 17 | Bon usage des médicaments en cas de vague de chaleur. Mise au point. Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), 2017 ([www.ansm.sante.fr/Dossiers/Conditions-climatiques-extremes-et-produits-de-sante/Canicule-et-produits-de-sante/\(offset\)/o](http://www.ansm.sante.fr/Dossiers/Conditions-climatiques-extremes-et-produits-de-sante/Canicule-et-produits-de-sante/(offset)/o)).
- 18 | TISSOT C - ÉPICEA. Une base de données sur les accidents du travail au service de la prévention. *Pratiques et métiers TM 43. Réf Santé Trav.* 2017 ; 152 : 91-97.
- 19 | Heat. In: *Reprotox*. Reproductive Toxicology Center, 2018 (<https://reprotox.org/>).
- 20 | TROTTIER M, CROTEAU A, GOULET L, POULIN M ET AL. - Analyse des données probantes sur le travail en ambiance chaude et ses effets sur les issues de grossesse. Publication 819. Québec : Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) ; 2008 : 63 p.
- 21 | HARTMANN S, BUNG P - Physical exercise during pregnancy. Physiological considerations and recommendations. *J Perinat Med.* 1999 ; 27 (3) : 204-15.
- 22 | CLAPP JF 3rd, DICKSTEIN S - Endurance exercise and pregnancy outcome. *Med Sci Sports Exerc.* 1984 ; 16 (6) : 556-62.
- 23 | LAFON D (Ed) - Grossesse et travail. Quels sont les risques pour l'enfant à naître ? Avis d'experts. Les Ulis : EDP Sciences ; 2010 : 561 p.
- 24 | JACKLITSCH B, WILLIAMS WJ, MUSOLIN K, COCA A ET AL. - Criteria for a recommended standard - Occupational exposure to heat and hot environments. Revised criteria 2016. DHSS (NIOSH) Publication 2016-106. NIOSH, 2016 (www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/pdfs/2016-106.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2016106).
- 25 | KUEHN L, McCORMICK S - Heat Exposure and Maternal Health in the Face of Climate Change. *Int J Environ Res Public Health.* 2017 ; 14 (853) : 1-13.
- 26 | HE JR, LIU Y, XIA XY, MA WJ ET AL. - Ambient Temperature and the Risk of Preterm Birth in Guangzhou, China (2001-2011). *Environ Health Perspect.* 2016 ; 124 (7) : 1100-06.
- 27 | LIN S, LIN Z, OU Y, SOIM A ET AL. - Maternal ambient heat exposure during early pregnancy in summer and spring and congenital heart defects. A large US population-based, case-control study. *Environ Int.* 2018 ; 118 : 211-21.
- 28 | AUGER N, FRASER WD, SAUVE R, BILODEAU-BERTRAND M ET AL. - Risk of Congenital Heart Defects after Ambient Heat Exposure Early in Pregnancy. *Environ Health Perspect.* 2017 ; 125 (1) : 8-14.
- 29 | 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. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 2006 : 59 p.
- 30 | Ergonomie des ambiances thermiques. Appareils de mesure des grandeurs physiques. Norme française homologuée NF EN ISO 7726. Janvier 2002. Indice de classement X 35-202. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 2002 : 62 p.
- 31 | Ergonomie de l'environnement thermique. Détermination du métabolisme énergétique. Norme française homologuée NF EN ISO 8996. Février 2005. Indice de classement X 35-205. Saint-Denis La Plaine : AFNOR ; 2005 : 30 p.
- 32 | 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.
- 33 | MEYER JP, TURPIN-LEGENDRE E, GINGEMBRE L, HORVAT F ET AL - Évaluation des contraintes thermiques à l'aide de la fréquence cardiaque : les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT). *Pratiques et métiers TM 34. Réf Santé Trav.* 2014 ; 140 : 83-94.
- 34 | TURPIN-LEGENDRE E, MEYER JP - Intérêt des mesures physiologiques et subjectives pour quantifier l'astreinte thermique. Cas particulier du port de combinaisons étanches. Grand angle TC 141. *Ref Santé Trav.* 2012 ; 131 : 19-32.
- 35 | BORG G - Borg's Perceived Exertion and Pain Scale. Champaign : Human Kinetics ; 1998 : 120 p.
- 36 | MEYER JP - Évaluation subjective de la charge de travail. Utilisation des échelles de Borg. *Pratiques et métiers TM 33. Réf Santé Trav.* 2014 ; 139 : 105-22.
- 37 | Ergonomie des ambiances thermiques. Évaluation 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.
- 38 | Principes généraux de ventilation. 4e édition. Guide pratique de ventilation o. Édition INRSED 695. Paris : INRS ; 2015 : 39 p.
- 39 | DOLEZ P, DECAENS J, BUNS T, LACHAPPELLE D ET AL. - Analyse du potentiel d'application des textiles intelligents en santé et en sécurité au travail. *Rapports scientifiques R-1029*. Montréal : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) ; 2018 : 100 p.

ANNEXE 1 Caractérisation de la charge physique au poste de travail, d'après la norme NF EN ISO 8996 [31]

Classification à 4 niveaux des charges physiques de travail (pénibilité), avec exemples			
Classe	Valeur pour le calcul du métabolisme moyen		Exemples
	W	W/m ²	
-	70	40	Sommeil
-	100	55	Repos assis
-	120	65	Repos debout
Léger	180	100	<ul style="list-style-type: none"> → Travail de secrétariat, travail manuel léger assis (taper sur un clavier, écrire, dessiner, coudre, faire de la comptabilité) → Travail assis avec de petits outils, inspection, assemblage ou triage de matériaux légers → Travail des bras et des jambes (conduite de véhicule dans des conditions normales, manœuvre d'une pédale) → Travail debout (fraisage, forage, polissage, usinage léger de petites pièces) → Utilisation de petites machines à main → Marche occasionnelle lente (inférieure à 3,5 km/h)
Moyen	300	165	<ul style="list-style-type: none"> → Travail soutenu des mains et des bras (cloutage, vissage, limage...) → Travail des bras et des jambes (manœuvre sur chantiers d'engins (tracteurs, camions...)) → Travail des bras et du tronc, travail au marteau pneumatique, plâtrage, sarclage, binage, cueillette de fruits et de légumes → Manutention manuelle occasionnelle d'objets moyennement lourds → Marche plus rapide (3,5 à 5,5 km/h), ou marche avec charge de 10 kg
Lourd	410	230	<ul style="list-style-type: none"> → Travail intense des bras et du tronc → Manutention manuelle d'objets lourds, de matériaux de construction → Travail au marteau → Pelletage, sciage à main, rabotage → Marche rapide (5,5 à 7 km/h), ou marche de 4 km/h avec charge de 30 kg → Pousser ou tirer des chariots, des brouettes lourdement chargés → Pose de blocs de béton
Très lourd	520	290	<ul style="list-style-type: none"> → Travail très intense et rapide (par exemple déchargement d'objets lourds) → Travail au marteau à deux mains ou à la hache (4,4 kg, 15 coups/minutes) → Pelletage lourd, creusage de tranchée → Montée d'escaliers ou d'échelles → Marche rapide, course (supérieure à 7 km/h)

ANNEXE 2 Tableau d'isolement thermique pour des tenues vestimentaires typiques, issu de la norme NF EN ISO 9920 [32]

Vêtements de travail	I_{cl}	
	clo	$m^2.K.W^{-1}$
Caleçon, combinaison, chaussettes, chaussures	0,7	0,11
Caleçon, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0,75	0,115
Caleçon, chemise, combinaison, chaussettes, chaussures	0,8	0,125
Caleçon, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	0,85	0,135
Caleçon, chemise, pantalon, blouse, chaussettes, chaussures	0,9	0,14
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1	0,155
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, combinaison, chaussettes, chaussures	1,1	0,17
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, veste isolante, chaussettes, chaussures	1,2	0,185
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste isolante, chaussettes, chaussures	1,25	0,19
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, combinaison, veste isolante et pantalon, chaussettes, chaussures	1,4	0,22
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures	1,55	0,225
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures	1,85	0,285
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2	0,31
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolants, surveste et sur-pantalon isolants, chaussettes, chaussures	2,2	0,34
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolants, parka et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2,55	0,395