

Guide d'évaluation des risques liés aux ambiances thermiques

ED 6532

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901, créée en 1947 sous l'égide de la Caisse nationale d'assurance maladie, administrée par un Conseil paritaire (employeurs et salariés).

De l'acquisition de connaissances jusqu'à leur diffusion, en passant par leur transformation en solutions pratiques, l'Institut met à profit ses ressources pluridisciplinaires pour diffuser une culture de prévention dans les entreprises et proposer des outils adaptés à la diversité des risques professionnels à tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, services de prévention et de santé au travail, instances représentatives du personnel, salariés...

Toutes les publications de l'INRS sont disponibles en téléchargement sur le site de l'INRS : www.inrs.fr

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS) de l'Assurance maladie - Risques professionnels, disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé notamment d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ces professionnels sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, instances représentatives du personnel, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Les caisses assurent aussi la diffusion des publications éditées par l'INRS auprès des entreprises.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite. Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 € (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2024.

Édition : Emmanuelle Chalaux (iNRS)

Conception graphique : Julie&Gilles

Mise en pages : Valérie Latchague Causse

Démarche de prévention
Risques

Guide d'évaluation des risques liés aux ambiances thermiques

ED 6532 |
novembre 2024

Brochure INRS élaborée par L. Robert, avec la contribution de M. Lebrun (Carsat Auvergne), D. Aoustin et Y. Guiban (Carsat Bretagne), O. Le Merrer (Carsat Centre-Ouest), C. Ruillard et K. Thévenot (Carsat Centre - Val de Loire), C. Lerat (Carsat Languedoc-Roussillon), E. Blin (Carsat Midi-Pyrénées), G. Dehoux (Carsat Nord-Est), F. Maître (Cramif), A. Janes (Carsat Hauts-de-France)

Sommaire

Abréviations et définitions	4
1 Quelques rappels	5
1.1 Contexte général	5
1.2 Le bilan thermique d'une personne dans son environnement	7
2 Origine de l'évaluation et stratégie : quelle est la situation ?	9
2.1 Situation <i>a priori</i>	9
2.2 Situation <i>a posteriori</i>	10
2.3 Situation particulière	10
3 Facteurs clés intervenant dans les échanges thermiques : les mesurer, les estimer	11
3.1 Métrologie des paramètres liés à l'environnement du poste de travail	12
3.2 Estimation des paramètres liés à la personne	15
3.3 Autres facteurs	18
4 Analyse et interprétation : quel niveau de contrainte ou d'inconfort ?	20
4.1 Les ambiances chaudes : l'indice ATP	20
4.2 Les ambiances froides : l'indice IREQ	22
4.3. Le confort thermique	25
5 Proposer des actions de prévention	30
5.1 Les actions techniques	30
5.2. Les actions organisationnelles et la sensibilisation des salariés	31
6 Fiches techniques	33
Bibliographie	39
Références	39
Pour en savoir plus	39

Abréviations et définitions

Légendes par ordre alphabétique

A_{DU} : Surface corporelle selon Dubois, en m^2
 C : Flux de chaleur par convection, en $W.m^{-2}$
 C_{res} : Flux de chaleur par respiration sous forme d'échange de chaleur, en $W.m^{-2}$
 D : Diamètre du globe noir, en m
 DR : Taux de personnes insatisfaites d'une gêne par courant d'air (en anglais : *Draught Rate*), en %
 $\Delta T_{a,v}$: Écart de température de l'air entre la tête et les chevilles, en $^{\circ}C$
 $\Delta T_{p,r}$: Écart de température de rayonnement entre deux surfaces opposées, en $^{\circ}C$
 E_{res} : Flux de chaleur par respiration sous forme d'échange de vapeur d'eau, en $W.m^{-2}$
 E_v : Flux de chaleur par évaporation de la sueur, en $W.m^{-2}$
 Fr : Émissivité du vêtement sans dimension
 H_b : Taille du sujet, en cm
 HR : Humidité relative, en %
 I_{cl} : Isolement thermique vestimentaire, en clo ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2.K.W^{-1}$)
 $I_{cl,r}$: Isolement thermique vestimentaire corrigé, en clo
 I_{mst} : Perméabilité du vêtement, en $l.m^{-2}.s^{-1}$
 K : Flux de chaleur par conduction, en $W.m^{-2}$
 M : Métabolisme énergétique, en W
 MET : Équivalent métabolique ; $1 \text{ MET} = 58,2 \text{ W.m}^{-2}$
 Pa : Pression partielle de vapeur d'eau (Pa), en kPa permettant d'exprimer l'humidité de l'air¹
 R : Flux de chaleur par rayonnement, en $W.m^{-2}$
 S : Débit de stockage de chaleur dans le corps, en $W.m^{-2}$
 T_a : Température (sèche) de l'air ambiant, en $^{\circ}C$
 $T_{a,l}$: Température locale de l'air ambiant, en $^{\circ}C$
 T_f : Température du sol, en $^{\circ}C$
 T_g : Température de globe noir, en $^{\circ}C$
 T_r : Température moyenne de rayonnement, en $^{\circ}C$
 T_{peau} : Température moyenne cutanée, en $^{\circ}C$
 T_{re} : Température rectale, en $^{\circ}C$
 T_s : Température de surface, en $^{\circ}C$
 T_w : Température de l'air humide, en $^{\circ}C$

T_{wc} : Température de refroidissement par le vent, en $^{\circ}C$
 Tu : Intensité de turbulence, en %
 V_a : Vitesse de l'air, en $m.s^{-1}$
 $V_{a,l}$: Vitesse moyenne locale de l'air, en $m.s^{-1}$
 W : Puissance mécanique utile, en $W.m^{-2}$
 W_a : Humidité absolue de l'air, en g d'eau par kg d'air sec
 W_b : Masse corporelle du sujet, en kg
 $\sigma_{V_{a,l}}$: Écart type de la vitesse locale de l'air, en $m.s^{-1}$

Acronymes

ATP : Astreinte thermique prévisible (acronyme anglais PHS pour *Predicted Heat Stress*)
DLE : Durée limite d'exposition
 DLE_{chal} : Durée limite d'exposition induite par un stockage de chaleur trop important dans le corps
 DLE_{hyd} : Durée limite d'exposition induite par une perte hydrique trop importante pour le corps
IREQ : Isolement thermique requis du vêtement
 $IREQ_{neutre}$: Isolement thermique requis du vêtement pour assurer un bilan thermique neutre pour le corps
 $IREQ_{min}$: Isolement thermique requis du vêtement assurant un bilan thermique à un niveau hyponormal
PD : Pourcentage d'insatisfaits induits par des inconforts locaux (de l'anglais *Percentage of Dissatisfied*)
PMV : Vote moyen prévisible (de l'anglais *Predicted Mean Vote*)
PPD : Pourcentage prévisible d'insatisfaits (de l'anglais *Predicted Percentage of Dissatisfied*)

Définitions de base

Contraintes : Caractéristiques physiques extérieures que doit supporter le corps
Astreintes : Réponses physiologiques du corps face à une contrainte
Confort : Sensation de bien-être perçue

1. Pour exprimer l'humidité de l'air, il existe plusieurs grandeurs (pression partielle de vapeur d'eau, humidité absolue, humidité relative). Les expressions de ces grandeurs sont explicitées en annexe du document.



1. Quelques rappels

Ce guide s'adresse aux chefs d'entreprises et aux préventeurs souhaitant évaluer les risques et inconforts liés aux ambiances thermiques sur les postes de travail.

Il propose une démarche d'étude de poste, basée sur le bilan thermique du corps dans un environnement donné pour un sujet standard en bonne santé et en capacité de réaliser le travail demandé. Pour être conduite, cette démarche d'évaluation nécessite l'utilisation d'instruments de mesure (thermomètres, anémomètre, hygromètre...).

1.1 Contexte général

De nombreux métiers exposent les salariés à des ambiances thermiques inconfortables, voire contraignantes, qui peuvent avoir de graves effets pour leur santé et leur sécurité en augmentant les risques d'accidents du travail.

Les expositions aux ambiances thermiques chaudes sont liées à différentes causes :

- des activités mettant en œuvre des matières en fusion ou des matériaux à haute température (fonderies, aciéries, fours, extrusion de matière plastique...);

- des conditions environnementales thermiquement contraignantes par la combinaison de la température et de l'humidité (buanderie, conserverie, cuisines...);

- des lieux de travail en extérieur;

- des locaux de travail mal conçus ou inadaptés (apports solaires trop importants, isolation thermique déficiente, ventilation insuffisante des locaux et procédés...).

Les expositions aux ambiances thermiques froides sont elles aussi liées à différentes situations dont :

- des activités dans des locaux réfrigérés (0 à 10 °C) ou en chambre froide (- 30 à 0 °C), notamment pour les salariés de l'industrie agroalimentaire, des entreprises d'installation et de maintenance des moyens de production de froid ou de certains entrepôts ou hangars;

- les travaux en extérieur dont les métiers du BTP, de l'agriculture, de l'installation et la maintenance de moyens de transport ou des moyens de production et de distribution de l'énergie. Ces risques sont renforcés dans les milieux en altitude.

Les effets de la température ambiante sur la santé ne se limitent pas à ceux liés aux températures extrêmes. De façon générale, le risque est plus important pour les ambiances thermiques chaudes que pour les ambiances thermiques froides.

1.1.1 Les effets sur la santé d'une ambiance thermique chaude

Les conséquences sanitaires de l'exposition à une ambiance thermique chaude sont liées à la réponse physiologique (augmentation de la fréquence cardiaque, vasodilatation, sudation), au dépassement des capacités de thermorégulation ou à une défaillance de la thermorégulation. La survenue d'affections directement liées à la chaleur dépend des conditions environnementales, des vêtements portés, de l'intensité de l'activité physique et de facteurs individuels, comme l'acclimatation ou la prise de médicaments.

Par niveau de gravité croissante, il peut s'agir de :

- dermite de chaleur liée aux phénomènes de macération de la sueur sous les tissus des vêtements ou miliaire sudorale liée à une obstruction des canaux sudorifères ;
- œdème de chaleur aux membres inférieurs, lié à la vasodilatation périphérique et à la gêne du retour veineux ;
- crampes de chaleur dues à une perte hydroélectrolytique lors d'une sudation intense, après des efforts musculaires importants ;
- syncope à l'arrêt d'un effort physique intense en environnement chaud ;
- syndrome d'épuisement / de déshydratation consécutif à une altération du métabolisme provoquée par une perte sudorale très importante, entraînant des maux de tête, des nausées, des syncopes, des troubles du sommeil et du comportement sans troubles neurologiques. La température corporelle peut dépasser 38 °C, mais sans atteindre 40 °C ;
- coup de chaleur à la suite d'une défaillance aiguë de la thermorégulation, associant une hyperthermie majeure (température corporelle supérieure à 40 °C) et des signes neurologiques : troubles du comportement, confusion mentale, délire, déficit focal, troubles de la conscience, voire coma. Le coup de chaleur peut conduire au décès.

L'hyperthermie menace les personnes exposées à une chaleur ambiante excessive ou fournissant un travail physique intense et prolongé avec une évacuation insuffisante de la chaleur, dans un environnement trop chaud et humide ou équipées de vêtements trop isolants. L'évolution peut être rapidement défavorable et met en jeu le pronostic vital. Il s'agit d'une urgence médicale.

De nombreux facteurs de risque individuels et comportementaux (âge avancé, pathologies chroniques, handicap, médicaments, alcool et stupéfiants) peuvent renforcer les risques liés à l'exposition à de fortes chaleurs.

D'autres effets des températures chaudes sont à craindre sur le lieu de travail : accroissement du risque d'incendie et d'explosion, des risques d'intoxication chimique par l'inhalation et le contact cutané.

1.1.2 Les effets sur la santé d'une ambiance thermique froide

La durée d'exposition, l'activité physique, les vêtements portés, l'environnement et sa température ont une importance capitale dans les mécanismes physiologiques de lutte contre le froid. L'intensité du froid ressenti est accentuée par le vent et l'humidité.

L'affection principale par sa gravité est l'hypothermie et correspond à une température corporelle centrale inférieure à 35 °C. En situation d'hypothermie, toutes les fonctions physiologiques se trouvent ralenties, y compris les systèmes cardiovasculaire et respiratoire, la conduction nerveuse, l'acuité mentale, le temps de réaction neuromusculaire et le métabolisme.

Les symptômes vont de l'hypothermie légère (entre 35 et 32 °C) avec des frissons, en passant des troubles de la conscience en hypothermie modérée (entre 32 et 28 °C) au coma et au décès pour l'hypothermie sévère (en dessous de 28 °C).

L'exposition au froid favorise certaines pathologies : cardiovasculaires (infarctus du myocarde et accidents vasculaires cérébraux), respiratoires (bronchospasme), troubles musculosquelettiques.

En milieux professionnels, diverses pathologies cutanées peuvent être provoquées par le froid :

- la xérose hivernale : peau sèche et rêche préférentiellement au niveau du visage et de la face antérieure des jambes, pouvant toucher également le dos des mains, les avant-bras, le tronc ;
- les engelures : gonflement inflammatoire et douloureux, de couleur rouge violacé, parfois accompagné de crevasses et affectant surtout les extrémités des membres et le visage ;
- l'urticaire au froid : érythème prurigineux des zones cutanées exposées au froid ;

- le syndrome de Raynaud : constriction des petites artérioles des extrémités, qui se manifeste d'abord par une pâleur cutanée, souvent suivie par un érythème et une cyanose.

De nombreux facteurs de risques individuels et comportementaux (âge avancé, poids, pathologies chroniques, handicap, médicaments, alcool et stupéfiants) diminuent les réponses thermorégulatrices de l'organisme au froid et amplifient les risques d'effets sur la santé.

Le travail au froid peut provoquer des malaises, des assoupissements, conduire à des erreurs ou à des accidents par la perte de dextérité. Il est responsable de gelures, de traumatismes par chutes, glissades, sur un sol gelé, ainsi que d'accidents de la route liés à la neige ou au verglas.

1.2 Le bilan thermique d'une personne dans son environnement

Qu'il s'agisse d'une situation de travail au froid ou à la chaleur, la démarche d'évaluation des risques repose toujours sur l'analyse du maintien de l'équilibre thermique du salarié dans son environnement de travail.

La stabilité de la température corporelle chez l'être humain implique un équilibre entre production de chaleur endogène (qui vient de l'intérieur du corps) et pertes ou gains de chaleur avec l'environnement : c'est le bilan thermique.

Ce bilan représente la somme de l'ensemble des échanges entre le corps et son environnement (voir figure 1 p. suivante).

Selon qu'ils soient reçus ou perdus par le corps humain, ces flux thermiques peuvent être positifs ou négatifs. Par convention, tout flux de chaleur reçu par le corps humain est positif et tout flux perdu est négatif. Certains termes comme E_{res} sont toujours négatifs, car toujours perdus par le corps.

La situation recherchée est celle de l'équilibre thermique, c'est-à-dire un terme « S » nul, sinon il y a perte ou accumulation de chaleur.

Lorsqu'on s'écarte des situations d'équilibre thermique, le corps s'adapte en répondant

naturellement par un surcroît de thermorégulation, c'est-à-dire en mettant en œuvre l'ensemble des mécanismes biologiques internes dédiés. Dans certains contextes d'exposition, l'atteinte de cet équilibre et sa conservation sur la durée peuvent être difficiles pour le corps, la situation sera alors qualifiée de thermiquement contraignante. À l'extrême, quand les capacités biologiques de réponse du corps sont dépassées et ne lui permettent plus d'atteindre ou de conserver son équilibre, la limitation de l'exposition est impérative.

Dans certaines ambiances de travail froides, le métabolisme lié à l'activité peut être insuffisant pour compenser la somme des autres échanges, le bilan est négatif ($S < 0$) et conduit à un refroidissement du corps humain. Au contraire, dans certaines ambiances chaudes, la somme des différents flux liés essentiellement à l'environnement venant s'ajouter au métabolisme rend le bilan largement positif pour le corps ($S > 0$). La personne reçoit trop de chaleur par rapport à ce qu'elle peut évacuer, principalement par sudation, ce qui conduit à une élévation de la température corporelle.

Toute contrainte thermique va induire une réponse physiologique du corps humain. Si celle-ci n'est pas suffisante, il y aura alors modification de la température interne (augmentation ou abaissement selon le cas d'exposition au chaud ou au froid respectivement) et dans le cas du chaud, d'importantes pertes hydriques interviendront par sudation. Les seuils physiologiques à considérer, et qui peuvent être dépassés en situation de contrainte thermique, sont les deux limites d'astreinte thermique que sont la température corporelle et la perte hydrique. Ils permettent de déterminer une durée limite d'exposition.

La situation d'un individu dans une ambiance thermique donnée est influencée par de nombreux paramètres, chacun ayant un impact plus ou moins marqué sur un ou plusieurs échanges thermiques du bilan. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories selon qu'ils se rattachent aux facteurs liés :

- à l'environnement : température de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse et humidité de l'air ;
- à l'activité du salarié : métabolisme énergétique (M) et travail mécanique utile éventuellement effectué pour la réalisation de sa tâche de travail (W) ;

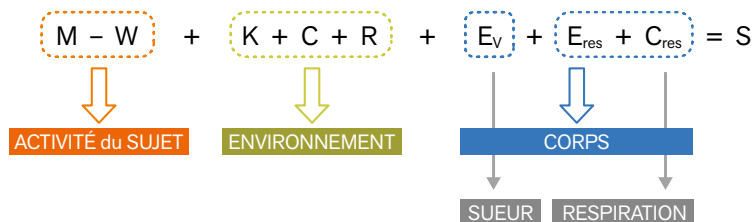
- aux vêtements : isolement thermique vestimentaire, perméabilité du textile à la vapeur d'eau et pouvoir de réflexion des vêtements.

Même si ces paramètres clés intervenant dans le bilan du corps humain ainsi que les différents échanges thermiques sont bien définis, il reste néanmoins très complexe de caractériser l'état de confort ou de contrainte thermique en jugeant de la situation sur l'ensemble de tous les paramètres. Des indices dits de « confort thermique » ou de « contraintes thermiques », issus de normes, permettent de caractériser la situation d'un individu dans une ambiance thermique donnée en intégrant l'ensemble de ces facteurs.

L'objet de ce guide est de définir la démarche à conduire si l'on cherche à caractériser une situation de contrainte (chaude ou froide) ou une situation d'inconfort et donc de détailler l'évaluation et l'interprétation de ces indices normalisés.

Trois cas se présentent :

- lorsqu'on est en situation de contrainte chaude, la démarche d'évaluation va se baser sur l'astreinte thermique prévisible (ATP) ;
- lorsqu'on est en situation de contrainte froide, le corps ayant nettement moins de possibilités de compenser un manque de chaleur, la démarche d'évaluation de la contrainte va reposer sur l'isolement vestimentaire requis (IREQ). Pour les situations de travail en extérieur en période hivernale, l'indice de refroidissement éolien permet d'évaluer rapidement les risques en prenant en compte la vitesse du vent et la température de l'air ;
- enfin, dans les autres situations, l'équilibre thermique est atteint, mais certaines personnes ressentent une situation d'inconfort chaud ou froid. Il est alors possible de quantifier cet inconfort par l'indice d'inconfort global PMV-PPD, ainsi que par des indices d'inconfort thermique local, comme la mise en évidence de courants d'air, d'une différence verticale de température d'air, de la présence de sols froids ou chauds, ou encore d'une asymétrie de température de rayonnement.



Avec :

- M : le métabolisme énergétique
- W : la puissance mécanique utile effectuée (souvent négligeable)
- K : les échanges par conduction par contact du corps avec des objets
- C : les échanges par convection entre le corps et l'air environnant

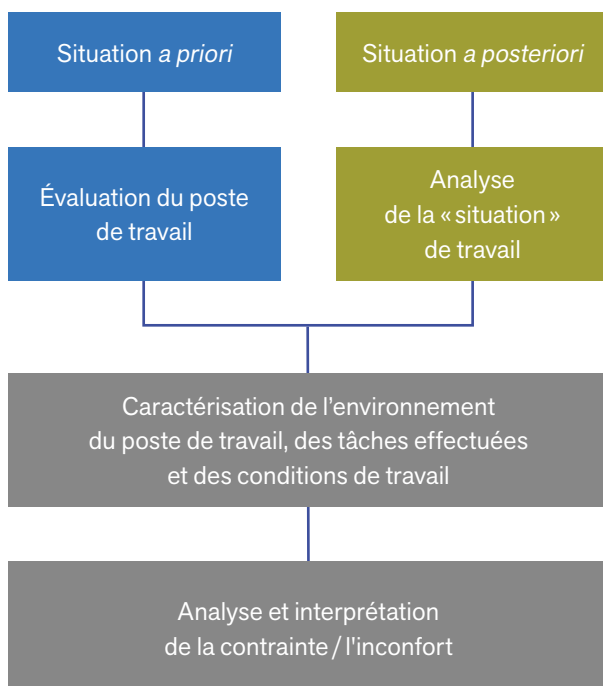
- R : les échanges par rayonnement avec les surfaces environnantes ou le soleil
- E_v : les échanges par évaporation de la sueur à la surface de la peau
- C_{res} et E_{res} : les échanges par la respiration sous forme de chaleur (C_{res}) et sous forme d'échange de vapeur d'eau (E_{res})
- S : l'accumulation de chaleur

Figure 1. Bilan thermique du corps



2. Origine de l'évaluation et stratégie : quelle est la situation ?

Avant d'engager la démarche d'évaluation des risques, il est important d'en définir le contexte. Généralement, on peut distinguer deux cas de figure : soit la démarche d'évaluation est induite par le constat d'une situation jugée *a priori* exposante pour les salariés, soit la démarche découle d'une situation ayant déjà occasionné des troubles, qu'il faut évaluer *a posteriori*.



■ Figure 2. Stratégie d'évaluation du risque

2.1 Situation *a priori*

Une démarche d'évaluation peut être entreprise dès lors que l'activité réalisée par les salariés est reconnue comme potentiellement exposante. Il peut s'agir de situations diverses, par exemple l'exposition à de très fortes ou de très basses températures d'air, de forts rayonnements thermiques, la combinaison de chaleur et d'humidité, de températures froides accompagnées de fortes vitesses d'air, ou encore des activités soutenues ou le port de tenues de travail particulières. Ce type de situations de travail est fréquemment rencontré en industrie, cela peut être le cas de postes de travail en verrerie, porcelainerie, fonderie, chaudronnerie, soudage, cuisine industrielle, agroalimentaire, de travail en extérieur, etc.

Dans cette démarche débutée avant l'apparition de tout trouble ou gêne pour les salariés, il sera nécessaire de caractériser les différentes situations de travail en les estimant à partir des données transmises par l'entreprise et de scénarios d'exposition représentant des conditions environnementales probables (température, humidité, rayonnement, vitesse d'air, etc.).

2.2 Situation *a posteriori*

Si des effets sur la santé ou le confort sont apparus, on parlera de situation *a posteriori*. Dans ce cas, il sera nécessaire de caractériser les situations ayant donné lieu à ces troubles ou tout du moins des situations les plus proches possibles de celles ayant conduit à ces effets ou inconfort. Il sera également important d'estimer toute variation (paramètres environnementaux, tâche de travail, tenue vestimentaire, posture...) intervenue comparée à la situation ayant réellement été à l'origine des troubles. Cela peut concerner par exemple une activité physique renforcée, un changement de conditions environnementales, un rayonnement infrarouge plus ou moins important ou un changement de tenue vestimentaire.

2.3 Situation particulière

Dans le cas particulier où un salarié doit intervenir dans des conditions extrêmes et de courtes durées (maintenance de fours, réparations de réseaux de chaleur, calorifugeage sur réseaux actifs), les mécanismes de régulation s'enclenchent mais peuvent vite être dépassés et on arrive à des astreintes excessives voire mortelles. La démarche d'évaluation du risque basée sur le bilan thermique du corps dans son environnement proposée ici ne peut donc pas convenir. Il est néanmoins possible de conduire une démarche d'évaluation différente, non plus basée sur le bilan thermique du corps dans son environnement, mais en évaluant un ensemble de mesures physiologiques propres aux personnes. Cette démarche ne fait pas l'objet du présent guide ; elle est décrite dans la norme NF EN ISO 9886 : 2004



3. Facteurs clés intervenant dans les échanges thermiques : les mesurer, les estimer

La détermination des valeurs des indices normalisés d'ambiance thermique (ATP, IREQ, PMV-PPD) issues du bilan thermique du corps dans son environnement de travail permet de réaliser une évaluation des risques. Ces indices reposent sur plusieurs paramètres qui devront pour certains être mesurés grâce à l'emploi de capteurs

spécifiques, et pour d'autres être estimés comme le métabolisme et l'isolement thermique de la tenue vestimentaire. Le tableau 1 ci-après permet de regrouper les différents paramètres nécessaires à l'estimation des indices et de visualiser les échanges thermiques pour lesquels ils ont un impact direct, représentés par des cases orange.

Tableau 1. Lien entre les différents paramètres mesurés ou exprimés à évaluer et les échanges thermiques entrant dans le bilan du corps

				CONDUCTION	CONVECTION	RAYONNEMENT	RESPIRATION	ÉVAPORATION SUEUR
				K	C	R	C _{res} , E _{res}	E _v
ENVIRONNEMENT	NF EN ISO 7726 (2002)	T _a	Température de l'air					
		T _r	Température moyenne de rayonnement					
		T _s	Température de surface					
		V _a	Vitesse de l'air					
		P _a	Humidité de l'air					
ACTIVITÉ	NF EN ISO 8996 (2021)	M	Métabolisme					
		W	Travail utile*					
VÊTEMENT	NF EN ISO 9920 (2007)	I _{cl}	Isolement					
		I _{mst}	Perméabilité					
		F _r	Facteur de réflexion					

* Il s'agit en réalité de la puissance mécanique développée par le sujet, mais cette notion est communément appelée « travail utile » dans les normes référentes.

■ Le cadre normatif relatif à la mesure et l'estimation des facteurs clés / paramètres

Concernant les paramètres physiques environnementaux (température, humidité, vitesse d'air et température moyenne de rayonnement), il faudra utiliser des moyens et méthodes de mesures permettant de satisfaire les recommandations de la norme de l'Afnor NF EN ISO 7726:2002, « Ergonomie des ambiances thermique. Appareils de mesure des grandeurs physiques ».

Le métabolisme sera déterminé suivant les méthodes proposées par la norme Afnor NF EN ISO 8996:2021, « Ergonomie de l'environnement thermique. Détermination du métabolisme énergétique ».

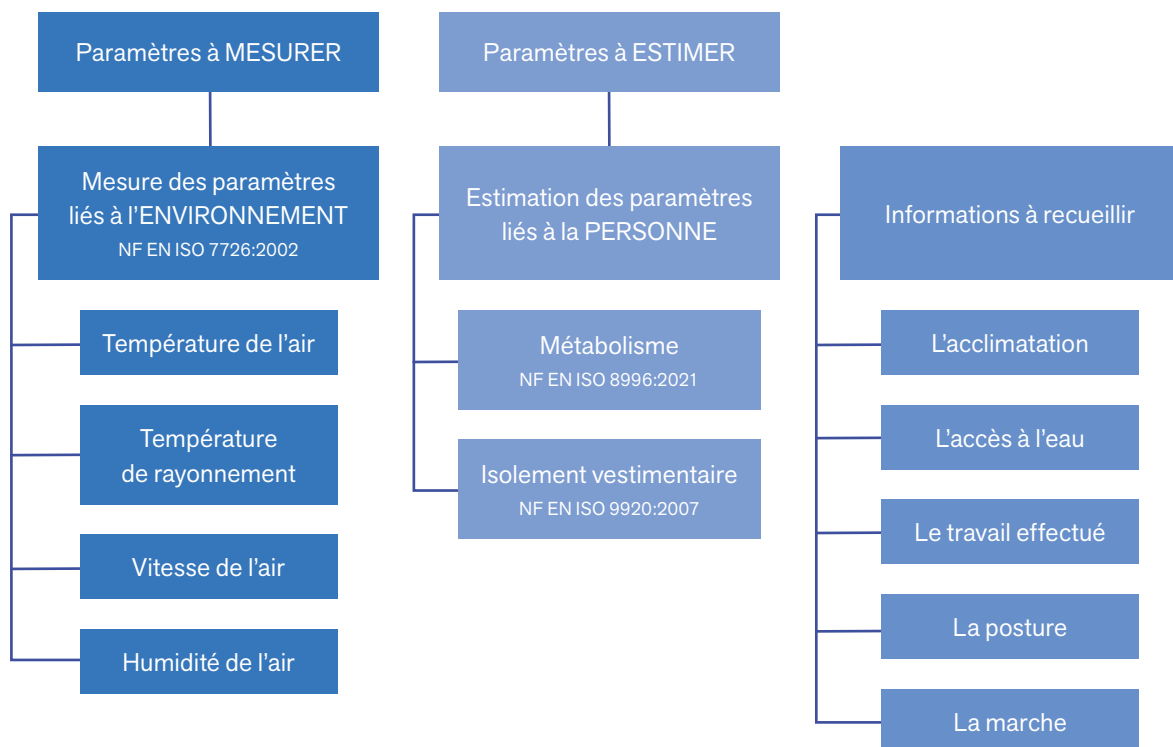
L'isolement vestimentaire sera déterminé suivant les méthodes proposées par la norme Afnor NF EN ISO 9920:2007, « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire ».

En plus de ces paramètres, un ensemble d'autres facteurs influençant l'analyse et l'interprétation des indices devra être, soit recueilli par observation du poste de travail, soit transmis par l'entreprise dans laquelle cette démarche d'évaluation est réalisée. L'ensemble des informations à recueillir avant l'interprétation et le calcul des indices adéquats est schématisé dans l'organigramme de la figure 3.

Ces paramètres devront être relevés pour les différentes séquences de travail et de pause sur l'ensemble de la journée de travail. Les durées et les enchaînements de ces séquences devront être connus.

3.1 Métrologie des paramètres liés à l'environnement du poste de travail

La caractérisation de l'ambiance thermique ne peut pas se faire sans la mise en place d'une métrologie permettant de caractériser l'environnement du poste de travail. Comme déjà mentionné, la



■ Figure 3. Paramètres et informations nécessaires à l'évaluation du risque

mesure de grandeurs physiques que sont 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 la norme NF EN ISO 7726-2002 (voir encadré p. précédente), ces mesures peuvent nécessiter des précautions de réalisation ou être associées à des subtilités de mise en œuvre qu'il s'avère judicieux de connaître pour garantir la caractérisation de la situation la plus représentative possible de la réalité de travail.

De façon générale, il sera important de positionner les appareils de mesure à proximité immédiate des postes de travail de façon à caractériser l'environnement réel dans lequel évolue le salarié. Après observation du poste de travail, selon la position du salarié (accroupi, assis, debout), il sera nécessaire d'ajuster la hauteur à laquelle les mesures seront réalisées. Certains capteurs ayant des temps de réponse plus longs que d'autres, il est conseillé de caractériser un poste de travail sur une durée suffisante (le plus souvent supérieure à 30 minutes). Cette durée permet à la fois la stabilité de réponse des appareils de mesure et ainsi d'obtenir une précision satisfaisante des relevés, mais aussi d'observer des variations pouvant être liées notamment aux procédés de fabrication ou aux déplacements d'air dans le local. Enfin, il sera important de bien vérifier que les plages de fonctionnement des appareils de mesure sont en adéquation avec les conditions environnementales dans lesquelles ils seront mis en œuvre pour assurer à la fois des mesures de qualité, mais aussi la pérennité des instruments.

3.1.1 La température de l'air : T_a

La température de l'air, exprimée en °C et désignée également sous le terme de température sèche, est un paramètre impactant les échanges par convection sur la peau et les vêtements ainsi que les échanges au niveau des voies respiratoires. Sa quantification est réalisée à l'aide de la mesure d'une grandeur physique continue. Différents principes physiques peuvent être utilisés pour les capteurs de température dont par exemples :

- le thermomètre à dilatation de liquide ;
- la variation de résistance électrique (sonde Pt 100 / thermistance CTN) ;
- l'effet thermoélectrique (thermocouples).

Le choix du type de capteur dépend de plusieurs paramètres dont l'étendue de mesure souhaitée, les incertitudes de mesures recherchées ainsi que la tenue au milieu où la sonde est placée (rayonnement thermique, milieu corrosif...).

La gamme de température préconisée pour couvrir les situations de contrainte thermique doit être comprise entre - 40 et + 120 °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, ce qui influe uniquement sur le temps de réponse de l'appareil ; il sera plus rapide dans le cas d'un cylindre ventilé.

3.1.2 La température moyenne de rayonnement : T_r

La température moyenne de rayonnement, aussi désignée sous le terme température radiante ou radiative, est exprimée en °C ; elle est la résultante des échanges thermiques par rayonnement entre le corps et l'ensemble de son environnement. Cette température est un paramètre prépondérant des échanges thermiques par transfert radiatif sur la peau et les vêtements.

Pour la mesurer, on utilise un globe noir, communément appelée « boule noire » (voir figure 4). Il s'agit d'un capteur de température avec une



■ Figure 4. Globe noir

gamme de mesure allant de -40 à $+150$ °C, placé dans un globe métallique peint en noir mat d'un diamètre standard de 15 cm. Il est possible d'utiliser un autre diamètre de globe noir, mais il est nécessaire d'appliquer une correction de la température de rayonnement (voir norme NF EN ISO 7726 : 2002). 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 (voir chap. 6, fiche technique n° 1 en annexe). Cette mesure simple requiert néanmoins des précautions, car une incertitude sur 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 également conseillé que le globe noir soit placé à la position qu'occupent les salariés afin de bien prendre en compte l'ensemble des flux radiatifs existants au poste de travail.

3.1.3 La vitesse de l'air : V_a

La vitesse de l'air est un paramètre prépondérant pour le renforcement des échanges thermiques par convection sur la peau et les vêtements. Elle se caractérise par son amplitude et sa direction, même si dans la démarche d'évaluation de la contrainte on ne tient compte que de son amplitude en m/s. Sa mesure est réalisée au moyen d'anémomètres omnidirectionnels ; la gamme de mesure conseillée doit couvrir 0,05 à 20 m/s. 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 (30 minutes) et de considérer la moyenne des valeurs obtenues. En revanche, connaître les fluctuations de vitesse permet de renseigner ou d'objectiver des situations d'inconfort local dont peuvent souffrir certains salariés

à des postes de travail spécifiques. Pour cela, les sondes de mesure doivent avoir un temps de réponse court : pour l'inconfort dans les situations de vitesses d'air faibles, la norme NF EN 7726 : 2002 exige un temps de réponse maximum de 0,5 s et recommande si possible d'atteindre 0,2 s.

3.1.4 L'humidité de l'air : P_a

L'air est un mélange d'air sec (constitué de gaz, dont principalement l'azote et l'oxygène) et de vapeur d'eau (eau à l'état gazeux). La quantité de cette vapeur d'eau détermine l'humidité de l'air. Celle-ci va fortement intervenir dans les échanges thermiques par évaporation sur la peau, les vêtements et les voies respiratoires.

L'humidité de l'air peut être exprimée sous différentes formes et unités :

- l'humidité absolue caractérise la quantité réelle de vapeur d'eau contenue dans l'air :
 - en g d'eau par kg d'air sec,
 - ou en pression partielle de vapeur d'eau en pascal ;
- l'humidité relative représente la quantité d'eau dans l'air par rapport à celle maximale que l'air pourrait contenir à saturation ; elle est exprimée en %.

Ces différentes grandeurs sont étroitement liées, et se déduisent les unes des autres sur un diagramme de l'air humide (voir chap. 6, fiche technique n° 1 en annexe).

La mesure de l'humidité se fait généralement grâce à l'utilisation d'une sonde capacitive, incluant un élément hygroscopique, c'est-à-dire sensible à la teneur en eau de l'air (par exemple un polymère à variation d'impédance électrique), dotée d'une gamme d'analyse allant de 5 à 95 % (0,5 à 6 kPa). L'utilisation d'un psychromètre est également possible. Il s'agit d'un instrument de mesure qui permet la détermination de l'humidité absolue à partir de la mesure de la température de l'air (dite température sèche) et de la température humide. Cette dernière est mesurée à l'aide d'un capteur de température entouré d'une mèche humide baignant dans un récipient d'eau. L'évaporation de l'eau autour de l'élément sensible conduit à un refroidissement du capteur d'autant plus important que l'air est plus sec.

3.2 Estimation des paramètres liés à la personne

3.2.1 Le métabolisme énergétique : M

Le métabolisme est la source de chaleur la plus importante fournie au corps. Il s'estime à partir de la quantité d'oxygène consommée à l'identique d'une réaction de combustion. Le métabolisme énergétique total est la somme du métabolisme de base et de celui de l'activité. Cette grandeur est analogue à une puissance et s'exprime en watt ; elle peut être exprimée également en MET (*voir glossaire en début de document*).

Le métabolisme de base

Le métabolisme de base correspond aux besoins énergétiques incompressibles de l'organisme : c'est-à-dire les besoins minimums d'énergie pour la survie de l'organisme : fonctionnement des organes vitaux, respiration, maintien de la température interne. Ces réactions, généralement du type dégradation des lipides, induisent une production de chaleur qui se propage de l'intérieur vers l'extérieur de l'organisme.

Le métabolisme d'activité

Au métabolisme de base, vient s'ajouter le métabolisme d'activité, qui est un métabolisme supplémentaire, principalement lié à l'activité musculaire.

Le métabolisme énergétique est une grandeur clé dans l'évaluation du risque, car elle peut induire des variations importantes dans le résultat de l'évaluation.

Plusieurs méthodes d'estimation du métabolisme énergétique sont proposées dans la norme NF EN ISO 8996 : 2021, « Ergonomie de l'environnement thermique. Détermination du métabolisme énergétique ». Elles sont regroupées en quatre niveaux de précision, mais seules les méthodes offrant une précision supérieure à celle du premier niveau sont compatibles avec la démarche d'évaluation proposée ci-après dans le tableau 2.

Le métabolisme énergétique, qui résulte de la transformation d'énergie chimique (transformation des lipides et sucres dans l'organisme) en puissance thermique (chaleur) et en puissance mécanique (travail musculaire), représente la dépense énergétique associée à une activité. C'est un facteur important pour déterminer le confort ou la contrainte résultant de l'exposition à un environnement thermique. Dans les environnements chauds notamment, les niveaux élevés de production de chaleur métabolique, associés à l'activité

Tableau 2. Niveaux d'évaluation du métabolisme énergétique extrait de la norme NF EN ISO 8996 : 2021

Niveaux	Méthode	Précision	Particularités
Niveau 1 Typologie d'activité	Classification en fonction du type d'activité	Information grossière Risque d'erreur très important	Niveau non recommandé
Niveau 2 Observation	Observation des tâches et des temps associés	Risque d'erreur élevé (20 %)	Niveau minimal recommandé
Niveau 3 Analyse	Mesure de la fréquence cardiaque	Risque d'erreur modéré (10 %)	Mise en place de mesures physiologiques sur le salarié par un service de prévention et de santé au travail Méthode basée sur la mesure de la fréquence cardiaque recommandée
	Accélérométrie des mouvements	Risque d'erreur pouvant être élevé	
Niveau 4 Expertise laboratoire	Diverses : consommation d'oxygène, calorimétrie directe...	Risque d'erreur moindre (5 %)	Méthodes nécessitant des mesures très spécifiques réservées à des experts

musculaire, aggravent la contrainte thermique dans la mesure où de plus grandes quantités de chaleur doivent être dissipées, principalement par évaporation de la sueur. Au contraire, dans les environnements froids, les niveaux élevés de production de chaleur métabolique aident à compenser les pertes excessives de chaleur à travers la peau et donc à réduire la contrainte induite par le froid.

Dans la nouvelle version de la norme NF EN ISO 8996: 2021, le métabolisme énergétique associé à une tâche est exprimé en watt. Or comme la chaleur associée à ce métabolisme énergétique doit sortir de l'intérieur du corps essentiellement par les échanges thermiques au niveau de la peau, il est pratique de l'exprimer par unité de surface corporelle, soit en watt par mètre carré. Les différentes normes s'accordent à préconiser l'utilisation de la formule de Dubois, comme estimation de la surface corporelle moyenne d'un sujet.

$$A_{DU} = 0,007184 \times W_b^{0,425} \times H_b^{0,725}$$

Avec :

W_b : la masse corporelle du sujet exprimée en kg

H_b : la taille du sujet exprimée en cm

La norme NF EN ISO 8996: 2021 propose, pour chaque niveau de précision 1 à 4, des données utiles pour estimer le métabolisme. La méthode minimale requise pour le calcul des indices de

contrainte correspondant au niveau 2 est présentée ci-après.

Cette méthode de caractérisation du métabolisme moyen repose sur l'observation de l'activité et des durées des tâches associées. Pour cela, la norme fournit des valeurs et des formules pour estimer le métabolisme en watts dans les cas suivants :

- le repos ou l'activité sédentaire ;
- les activités avec déplacement avec ou sans charge portée ou la montée ou descente d'escaliers ou d'échelles ;
- les activités sans déplacement : par exemple soulever ou abaisser une charge, des activités de travail sollicitant certaines parties du corps (un bras, deux bras, le corps entier...) ou des activités très spécifiques.

Pour évaluer le métabolisme énergétique moyen sur une période donnée, il est donc nécessaire de réaliser une étude détaillée du travail qui implique de :

- déterminer la liste des tâches effectuées pendant cette période ;
- d'estimer le métabolisme énergétique de chacune de ces tâches ;
- de déterminer le temps consacré à chacune d'entre elles.

Deux exemples de calcul du métabolisme moyen pour un homme de 80 kg et de 1,8 m sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Exemples de calcul du métabolisme moyen

Exemple 1	Exemple 2
Salarié effectuant un travail d'intensité légère, en position debout, impliquant ses deux bras pendant 7 heures, entrecoupé de pauses d'une durée cumulée d'une heure	Salarié effectuant une activité nécessitant : – plusieurs descentes et montées d'escalier avec un dénivelé de 5 m – les montées s'effectuant en 40 s et les descentes en 30 s pour une durée totale de 60 minutes – un déplacement sur le plat à 4 km.h ⁻¹ en portant une charge de 2 kg le long du corps sur une durée de 3 heures
– Métabolisme d'activité M_5 : 240 W – Métabolisme de repos M_0 : 120 W $M = \frac{M_5 \times 7 + M_0 \times 1}{8}$ – Métabolisme pour ce salarié : 225 W, ramené à la surface corporelle : 113 W.m⁻²	– Métabolisme correspondant à la descente et montée d'escalier M_3 : 301 W – Métabolisme de déplacement M_2 : 372 W $M = \frac{M_3 \times 1 + M_2 \times 3}{4}$ – Métabolisme pour ce salarié : 354 W, ramené à la surface corporelle : 178 W.m⁻²

3.2.2 L'isolement vestimentaire :

I_{cl}

L'isolement vestimentaire, exprimé en clo ou encore en $m^2.K.W^{-1}$ caractérise la résistance thermique d'une ou plusieurs couches de vêtements, c'est-à-dire la résistance au transfert de chaleur entre la surface interne d'un vêtement et sa surface externe.

Étant donné qu'il est assez fastidieux de calculer l'isolement thermique d'une tenue vestimentaire, la norme NF EN ISO 9920 : 2007 fournit des tableaux de données de l'isolement vestimentaire, noté I_{cl} , pour des tenues complètes dont un extrait est repris dans le tableau 4 ci-après.

Tableau 4. Valeurs d'isolement thermique de tenues vestimentaires typiques – Extrait de la norme NF EN ISO 9920 : 2007

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

Vêtement de travail	I_{cl} en clo	I_{cl} en $m^2.K.W^{-1}$
Sous-vêtement à manches et jambes longues, veste et pantalon isolants, parka et salopette ouatinées, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2,55	0,395
Slip, tee-shirt, short, chaussettes fines, sandales	0,3	0,05
Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures	0,5	0,08
Caleçon, chemise, pantalon léger, chaussettes, chaussures	0,6	0,095
Slip, jupon, bas, robe, chaussures	0,7	0,105
Sous-vêtement, survêtement de sport, chaussettes montantes, chaussures de sport	0,75	0,115
Slip, jupon, chemise, jupe, chaussettes montantes épaisses, chaussures	0,8	0,12
Caleçon, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, tricot, chaussettes, chaussures	0,95	0,145
Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1	0,155
Slip, bas, chemise, jupe, gilet, veste, chaussettes, chaussures	1	0,155
Sous-vêtements, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,1	0,17
Sous-vêtements, maillot de corps à manches courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, chaussettes, chaussures	1,15	0,18
Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot, veste, chaussettes, chaussures	1,3	0,2
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures	1,5	0,23

La norme NF EN ISO 9920 : 2007 fournit un plus large panel de tenues vestimentaires. Elle propose également l'isolement vestimentaires de pièces unitaires (robe, pantalon, veste, chemise, sous-vêtement, chaussette, etc.). La connaissance de l'isolement pour de telles pièces spécifiques présente l'intérêt de pouvoir définir, par sommation, l'isolement d'une tenue qui ne serait pas décrite. Elle permet aussi de rajouter ou de retrancher un élément vestimentaire qui, soit ne serait pas compris dans une tenue standard décrite dans la norme, soit serait ajouté (par exemple des gants, un bonnet, une blouse, etc.). Cette démarche permet d'être plus précis quant à l'évaluation de l'isolement vestimentaire de la tenue de travail.

3.3 Autres facteurs

3.3.1 L'acclimatation

L'acclimatation est l'aptitude qu'a le corps à s'adapter à un milieu.

En pratique, lors d'expositions à la chaleur, les personnes acclimatées sont en mesure de transpirer plus abondamment, de façon plus homogène et plus rapidement que les personnes non acclimatées. Dans une situation de travail donnée, ceci donne lieu à un stockage de chaleur moindre (température corporelle centrale plus faible) et à une contrainte cardiovasculaire réduite (fréquence cardiaque plus faible). Par ailleurs, ces personnes sont réputées perdre moins de sels minéraux par la sudation ; elles sont donc capables de résister à une perte hydrique plus importante. Cette différenciation entre personnes acclimatées et non acclimatées est par conséquent essentielle dans cette démarche d'évaluation basée sur l'astreinte prévisible du corps en réponse à une contrainte.

Il existe également une acclimatation pour les personnes exposées au froid, mais les ajustements physiologiques sont plus modestes. Une acclimatation locale par une limitation de la vasoconstriction cutanée périphérique permet aux mains de rester plus chaudes. La circulation du sang est meilleure au niveau de la main, la performance manuelle est conservée, la douleur est diminuée. De même, les frissons apparaissent pour une

température corporelle plus basse. Il s'agit donc d'une adaptation cardiovasculaire et cutanée. Lors d'expositions répétées au froid, les salariés s'adaptent et ressentent moins d'inconfort. Cette acclimatation diminue l'effet de distraction que peut provoquer le froid et améliore le jugement et la prudence.

On peut considérer qu'une personne est acclimatée lorsqu'elle est exposée depuis plus de 8 jours aux conditions d'ambiance considérées, mais ce phénomène d'acclimatation peut être plus long. À défaut d'information sur l'acclimatation des salariés, il convient de considérer que les personnes ne sont pas acclimatées. En effet, l'acclimatation est une adaptation physiologique propre à chacun, une prise en compte non adéquate de ce critère peut conduire à une sous-estimation de la contrainte.

3.3.2 L'accès à l'eau

Dans le cas où une personne est exposée en continu à la chaleur, le risque de déshydratation existe, compte tenu de la perte sudorale. Il est à cet égard obligatoire de mettre à disposition de l'eau potable fraîche et d'organiser des pauses régulières afin d'en faciliter l'ingestion en quantité nécessaire. L'organisation du travail doit être adaptée pour permettre un accès à l'eau régulier même dans les situations de travail où cela semble difficile : moyens de protection (masques) ou conditions d'hygiène spécifiques à l'activité (travaux en présence de plomb par exemple)...

Même avec un accès à l'eau potable, la consommation d'eau dépend de chaque personne. Si le salarié ne se réhydrate pas, les durées limites d'exposition (*voir chapitre 4*) estimées par l'indice d'astreinte thermique prévisible de la norme NF EN ISO 7933 : 2023 sont réduites.

3.3.3 La posture

Il est nécessaire de prendre en compte la posture des salariés, car elle impacte à la fois la fraction du corps participant aux échanges thermiques et le métabolisme énergétique. Les normes définissent trois positions standards de travail qui sont : le travail accroupi, le travail assis ou la position debout.

3.3.4 La puissance mécanique du travail effectué

La puissance mécanique est le rapport entre la quantité d'énergie à fournir pour effectuer une tâche et le temps nécessaire pour la réaliser. Si l'on compare le corps humain à une « machine », la puissance mécanique est la part d'énergie métabolique qui devra être transformée pour être mobilisée vers l'objet à porter ou à manutentionner. Pour un individu moyen, ce rendement mécanique est généralement de l'ordre de 10 %, c'est-à-dire que seul 10 % de l'énergie métabolique est utilisée pour réaliser une tâche, les 90 % restant sont transformés en chaleur que le corps doit pouvoir évacuer pour maintenir sa température constante.

Pour l'évaluation, l'énergie dépensée au travail est présumée être complètement transformée en chaleur. Cette approximation ne porte pas préjudice à l'évaluation du risque, car elle est conservatrice et agit dans le renforcement de la prévention ; cela revient en effet à considérer que le salarié doit évacuer l'intégralité de son énergie métabolique pour équilibrer son bilan thermique.

3.3.5 La marche

Cette activité participe aux échanges thermiques. Outre le métabolisme énergétique nécessaire pour la réaliser, elle renforce les vitesses d'air liées au déplacement et participe aux échanges par convection. Il est donc intéressant de connaître sa vitesse et sa direction par rapport à la vitesse de l'air.

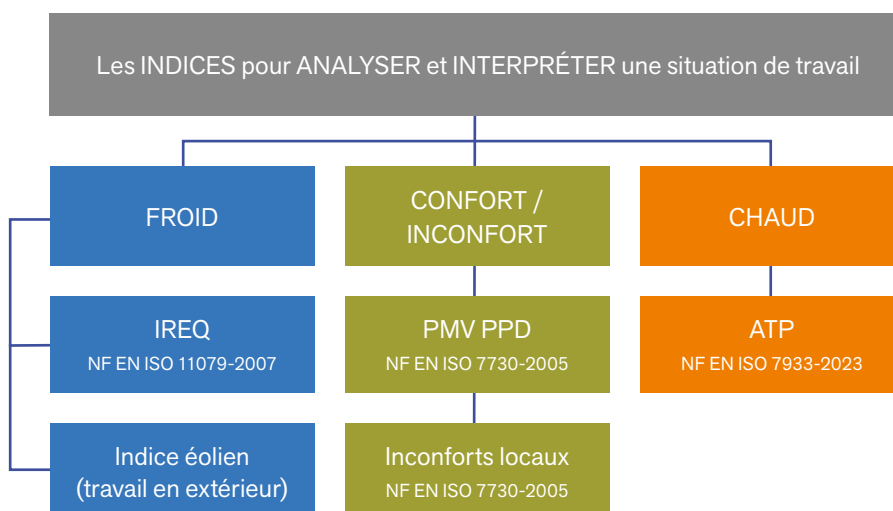


4. Analyse et interprétation : quel niveau de contrainte ou d'inconfort ?

Cette étape permet, à partir des données relevées ou estimées, de déterminer les niveaux de contraintes et de risques pour la santé des salariés ou simplement d'inconfort et de gêne. Pour mémoire, seront présentés ici l'ATP pour les situations de contraintes chaudes, l'IREQ complété par l'indice de refroidissement éolien pour les situations de contraintes froides ainsi que l'indice PMV-PPD pour les situations d'inconfort. D'autres indices existent, comme le WBGT pour *Wet Bulb Globe Temperature* et l'Humidex ; ils ne seront pas abordés dans le présent guide.

4.1 Les ambiances chaudes : l'ATP

En situation de contrainte chaude, la méthode d'évaluation la plus pertinente est l'ATP (astreinte thermique prévisible). Elle est encadrée par la norme NF EN ISO 7933 : 2023 qui spécifie une méthode d'évaluation analytique et d'interprétation de la contrainte thermique subie par une personne dans un environnement thermique chaud. Elle permet de prédire le débit sudoral et la température corporelle centrale que l'organisme humain



■ Figure 5. Indices de confort ou de contrainte présentés dans ce guide

■ Le cadre normatif relatif aux indices

En ambiance chaude contraignante : norme Afnor NF EN ISO 7933 : 2023, « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible »

En ambiance froide contraignante : norme Afnor NF EN ISO 11079 : 2007, « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination et interprétation de la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis du vêtement (IREQ) et les effets du refroidissement local »

En (in)confort thermique : norme Afnor NF EN ISO 7730 : 2005, « Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local »

met en œuvre en réaction aux conditions de travail à la chaleur.

Le calcul est basé sur les équations générales du bilan thermique d'une personne placée dans une ambiance thermique spécifiée ; l'interprétation de l'ATP est effectuée sur la base de deux critères de contrainte et en fonction de deux limites d'astreintes pour le corps, qui sont la température centrale maximale et la perte hydrique maximale. Les valeurs de ces limites d'astreinte sont fonction du degré d'acclimatation de la personne et de son accès à l'eau. En cas de déséquilibre thermique, l'élévation de la température centrale doit être limitée, de manière à réduire au maximum le risque de tout effet pathologique. De même, il convient de limiter la perte hydrique de l'organisme à une valeur maximale compatible avec le maintien de l'équilibre hydrominéral du corps. Les valeurs limites d'astreinte de ces deux grandeurs sont définies pour protéger 95 % des travailleurs.

En ce qui concerne la perte hydrique maximale pour une journée de travail, pour une personne ayant un libre accès à l'eau, la valeur retenue est une perte de 5 % de sa masse corporelle.

En revanche, si le sujet n'a pas accès à l'eau, cette valeur est réduite à 3 % de la masse corporelle. La norme NF EN ISO 7933 : 2023 indique qu'une déshydratation avec une réduction de 3 % de la masse corporelle entraîne une augmentation de la fréquence cardiaque et une réduction de la sensibilité des mécanismes de sudation ; elle est par conséquent reconnue comme un seuil de déshydratation maximale dans l'industrie. L'ATP ne s'applique pas aux militaires ou aux sportifs.

De façon générale, l'évaluation est menée pour un sujet standard. Le sujet standard considéré par la norme a une surface corporelle de 1,8 m². Il reste possible de définir le poids et la taille du sujet qu'il soit homme ou femme.

En ce qui concerne l'élévation de la température centrale maximale, basée sur des recommandations de l'OMS, elle ne doit pas dépasser 1 °C. Cette valeur d'élévation de la température de 1 °C est issue d'un rapport de l'OMS sur la base d'une étude réalisée sur une population d'hommes, jeunes, portant des vêtements plutôt légers, acclimatés et évoluant dans des conditions où l'humidité de l'air est de 40 %.

Or dans les entreprises, les situations peuvent être plus variées et contraignantes. Dans le souci de prévenir les risques quelles que soient les populations de travailleurs concernées, des valeurs plus strictes d'astreintes ont été choisies comme valeurs seuil de prévention faisant consensus dans le réseau de prévention des risques professionnels :

- une élévation de la température rectale² de 0,8 °C et
- une perte hydrique de 5 % de la masse corporelle plafonnée à 3 000 g en ayant accès à l'eau.

Tant que le stockage de chaleur est nul (pas d'élévation de la température corporelle centrale au-delà du seuil défini) et que la limite de la perte hydrique maximale n'est pas atteinte, la durée de travail peut être maintenue. Néanmoins une amélioration des conditions de travail doit être envisagée pour améliorer le confort thermique des salariés.

2. L'ATP repose sur les variations de la température centrale du corps inhérentes à une situation exposante. La valeur d'astreinte se base sur la température rectale. Ces deux grandeurs sont quasi équivalentes.

Au-delà, la durée d'exposition doit être limitée à la plus petite des deux valeurs suivantes :

- durée (DLE_{chal}) pour atteindre le stockage de chaleur maximal admissible, soit une température rectale de 37,8 °C maximum ;
- durée (DLE_{hyd}) pour atteindre la perte hydrique maximale admissible. Si celle-ci est atteinte aucune nouvelle exposition n'est tolérée dans la journée.

L'ATP permet donc de déterminer des durées limites d'exposition. Lorsque celles-ci sont inférieures à 8 heures, il est nécessaire d'agir sur les facteurs de risques et de mettre en œuvre des solutions de prévention. En revanche, en l'absence de durée limite d'exposition, toute mesure de prévention permettant d'améliorer la situation doit être néanmoins adoptée. L'ATP permet également d'évaluer l'impact des variations des paramètres ambiants sur l'équilibre thermique.

Les plages de validité du modèle ATP sont données dans le tableau 5.

Les calculs conduisant à la définition des durées limites d'exposition étant itératifs et faisant appel à un nombre important d'équations relatives notamment aux différents échanges thermiques, un outil de calcul intitulé « Ambiances thermiques : outil d'évaluation » est mis à disposition sur le site de l'INRS.

L'évaluation est réalisée sur la base d'une exposition journalière de 8 heures soit sur une séquence globale, soit en alternant des séquences de travail et de récupération. En effet, l'outil offre la possibilité de découper la journée de travail en trois séquences de travail et de repos. Les séquences de travail ne doivent pas être inférieures à 120 minutes et celles de repos à 30 minutes. La durée totale de ces différentes séquences doit être de 480 minutes, soit

8 heures. Pour chacune des séquences retenues, il est nécessaire de renseigner les différents paramètres qui la caractérisent.

4.2 Les ambiances froides : l'IREQ

4.2.1 L'IREQ

Les basses températures, associées ou non à la présence de vent, peuvent rompre l'équilibre thermique du corps humain. En effet, le corps humain dispose de peu de ressources internes pour lutter contre une perte excessive de chaleur. En choisissant correctement les vêtements, il est souvent possible de contrôler et réguler les pertes thermiques corporelles. Aussi, la méthode d'évaluation des risques utilisée en contrainte froide est basée sur l'évaluation de l'isolement des vêtements – isolement requis pour maintenir le bilan thermique du corps à l'équilibre. Plus la puissance refroidissante de l'environnement est élevée, plus la valeur IREQ est elle-même élevée pour un niveau d'activité fixé. De la même façon, pour des conditions climatiques données, la contrainte liée au froid, autrement dit l'IREQ, diminue lorsque l'activité augmente, car cette dernière s'accompagne de production de chaleur métabolique.

Cette méthode d'évaluation des risques est encadrée par la norme NF EN ISO 11079 : 2007. L'équation de bilan thermique utilisée, précédemment explicitée, est résolue pour l'isolement thermique requis du vêtement (IREQ), qui permet de

Tableau 5. Plages de validité du modèle d'astreinte thermique prévisible ATP pour les différents paramètres du modèle issu de la norme NF EN ISO 7933 : 2023

Plages de validité du modèle d'astreinte thermique ATP			
Paramètres	Unités	Minimum	Maximum
Température de l'air	°C	15	50
Pression partielle de vapeur d'eau	kPa	0,5	4,5
Différence entre la température de rayonnement et d'air	°C	0	60
Vitesse d'air	m.s ⁻¹	0	3
Métabolisme	W.m ⁻²	56	250
Isolement vestimentaire	clo	0,1	1,0

maintenir l'équilibre thermique en respectant des critères d'astreinte physiologique correspondant à une perte calorique à ne pas dépasser et une température de peau minimale. L'IREQ est exprimé en clo.

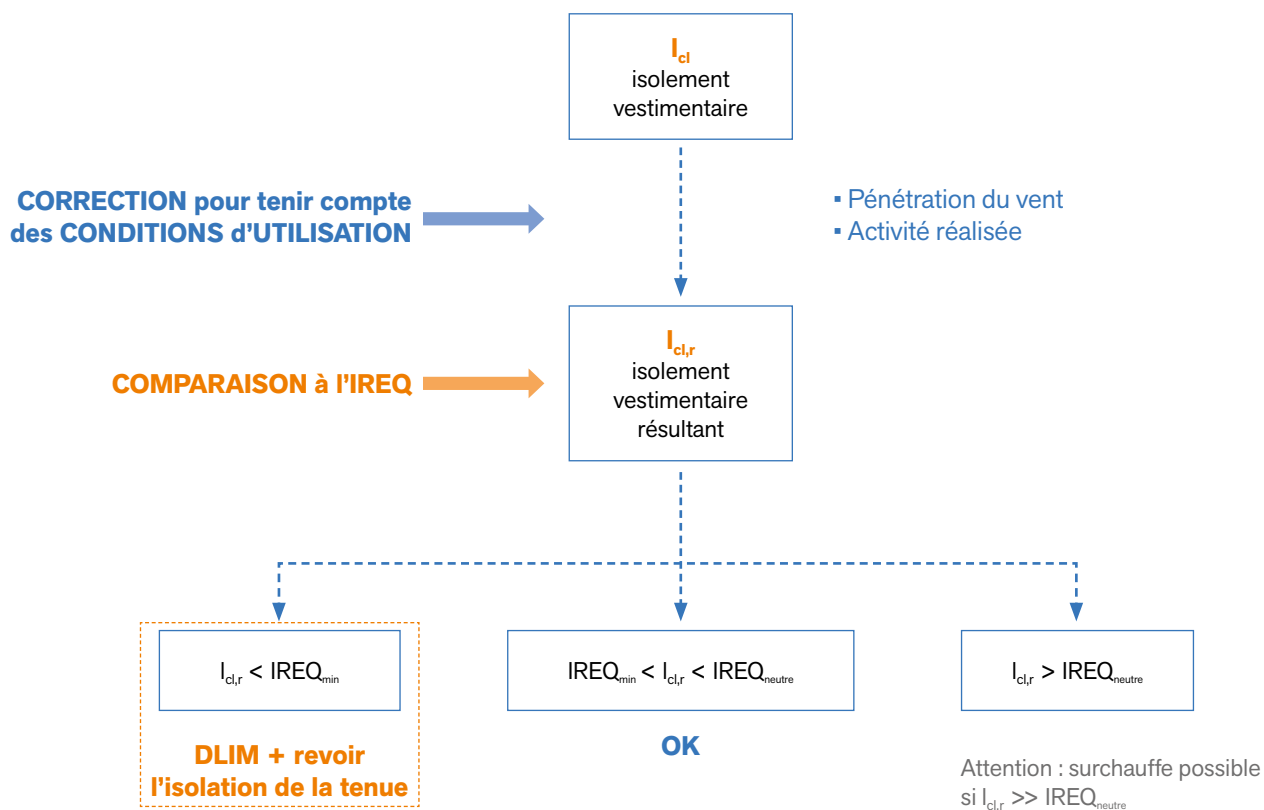
Il est défini à deux niveaux d'astreinte physiologique :

- un IREQ dit « minimal » définit l'isolement thermique vestimentaire minimal requis pour maintenir l'équilibre thermique du corps à un niveau hypotonormal de la température moyenne du corps. De ce fait, la valeur IREQ minimale représente un certain refroidissement corporel, en particulier des parties périphériques du corps. Dans ce cas, lors d'exposition prolongée, le refroidissement des extrémités peut devenir un facteur limitant pour la durée d'exposition ;
- un IREQ dit « neutre » définit l'isolement thermique vestimentaire requis pour créer les conditions de neutralité thermique, c'est-à-dire pour maintenir un équilibre thermique à un niveau normal de température moyenne du corps. Ce niveau représente l'absence de refroidissement ou un refroidissement minimal du corps humain.

Le principal objectif de la méthode IREQ est de déterminer par l'analyse si le vêtement choisi assure un isolement thermique suffisant pour établir un niveau d'équilibre thermique défini (minimal ou neutre). La norme NF EN ISO 9920 : 2007 permet de définir la valeur d'isolement thermique théorique d'un ensemble vestimentaire : I_{cl} . Dans la réalité la perméabilité à l'air des vêtements, les conditions d'activité de la personne et l'environnement dans lequel elle évolue vont impacter la résistance thermique de la tenue de travail, c'est pourquoi il est nécessaire de corriger cette valeur d'isolement ($I_{cl,r}$) avant de la comparer à la valeur de l'IREQ obtenu. Cette correction est prévue dans la norme NF EN ISO 11079 : 2007.

Si l'isolement thermique du vêtement résultant ($I_{cl,r}$) est inférieur à la valeur IREQ, une durée limite d'exposition (DLE) est calculée à partir des niveaux acceptables de refroidissement corporel, minimal ou neutre. La figure 6 explicite la démarche.

De par sa démarche particulière qui vise à comparer l'isolement thermique d'un vêtement de travail par rapport à une valeur requise permettant de



■ Figure 6. Démarche IREQ selon la NF EN ISO 11079 : 2007

maintenir le corps dans un état d'équilibre thermique à des niveaux acceptables, l'IREQ permet à la fois d'évaluer la contrainte froide et de proposer des solutions de prévention.

En effet, on peut utiliser l'IREQ pour définir les exigences relatives à l'isolement thermique du vêtement nécessaire et choisir ensuite le vêtement à utiliser dans les conditions réelles de travail. Mais il est surtout possible d'évaluer les variations des paramètres ambiants sur l'équilibre thermique. Cela permet d'adopter des mesures de prévention collective en améliorant :

- l'environnement thermique du poste de travail ;
- l'organisation du travail à adopter dans ces conditions.

Les plages de validité du modèle IREQ sont indiquées dans le tableau 6.

De la même façon que pour l'ATP, les calculs conduisant à la définition de l'IREQ et des durées limites d'exposition inhérentes étant itératifs et faisant appel à un nombre important de calculs intermédiaires, un outil de calcul intitulé « Ambiances thermiques : outil d'évaluation » est mis à disposition sur le site de l'INRS.

Enfin, outre la définition de l'isolement requis, la norme d'évaluation du risque NF EN ISO 11079 : 2007 insiste sur les refroidissements localisés (voir tableau 7). En effet, il est important de savoir que le refroidissement local d'une partie quelconque du corps, en particulier des mains, des

pieds, de la tête et des voies respiratoires, peut engendrer une gêne, une dégradation des performances manuelles et physiques, une blessure ou un accident de travail.

4.2.2 L'indice de refroidissement éolien

Pour les travaux en extérieur, le risque est aggravé en cas d'exposition au vent (voir tableau 8 page suivante). La sensation de refroidissement est causée par l'effet combiné de la température et du vent. L'indice de refroidissement éolien, établi par les météorologues canadiens, exprime une température de refroidissement par le vent T_{wc} en °C. Il donne donc une température équivalente ressentie par l'organisme en fonction de la vitesse du vent, pour des individus adultes portant des vêtements d'hiver. Des classes de risque sont associées à cet indice. Selon la valeur de T_{wc} , le risque peut être considéré comme :

- risque faible de gelures ou hypothermie ;
- risque modéré de gelure des zones de peau exposée pouvant arriver entre 10 et 30 minutes et d'hypothermie ;
- risque élevé de gelure entre 2 à 10 minutes sans protection intégrale ni activité ;
- zone de danger extrême où toute activité à l'extérieur est proscrite.

Tableau 6. Plages de validité du modèle IREQ pour les différents paramètres du modèle issu de la norme NF EN ISO 11079 : 2007

Plages de validité du modèle de contrainte thermique froide IREQ			
Paramètres	Unités	Minimum	Maximum
Température de l'air	°C	---	10
Vitesse d'air	m.s ⁻¹	0,4	18
Isolement vestimentaire	clo	0,5	---

Tableau 7. Critères physiologiques pour le refroidissement local issus de la norme NF EN ISO 11079 : 2007

Refroidissement général	« Astreinte élevée »	« Astreinte faible »
Température des doigts (°C)	15 °C	24 °C
Voies respiratoires Activité faible ($M \leq 115 \text{ W.m}^{-2}$) Activité soutenue ($M > 115 \text{ W.m}^{-2}$)	$T_a = -40 \text{ °C}$ $T_a = -30 \text{ °C}$	$T_a = -20 \text{ °C}$ $T_a = -15 \text{ °C}$

Tableau 8. Température de refroidissement par le vent T_{wc} et classe de risque associée issues de la norme NF EN ISO 11079 : 2007

Vitesse du vent en km/h ▼	Température de l'air extérieur mesurée sous abri en °C										
	0	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35	- 40	- 45	- 50
5	- 1,6	- 7,3	- 12,9	- 18,6	- 24,3	- 30,0	- 35,6	- 41,3	- 47,0	- 52,6	- 58,3
10	- 3,3	- 9,3	- 15,3	- 21,2	- 27,2	- 33,2	- 39,2	- 45,1	- 51,1	- 57,1	- 63,0
15	- 4,4	- 10,6	- 16,7	- 22,9	- 29,1	- 35,2	- 41,4	- 47,6	- 53,7	- 59,9	- 66,1
20	- 5,2	- 11,6	- 17,9	- 24,2	- 30,5	- 36,8	- 43,1	- 49,4	- 55,7	- 62,0	- 68,3
25	- 5,9	- 12,3	- 18,8	- 25,2	- 31,6	- 38,0	- 44,5	- 50,9	- 57,3	- 63,7	- 70,2
30	- 6,5	- 13,0	- 19,5	- 26,0	- 32,6	- 39,1	- 45,6	- 52,1	- 58,7	- 65,2	- 71,7
35	- 7,0	- 13,6	- 20,2	- 26,8	- 33,4	- 40,0	- 46,6	- 53,2	- 59,8	- 66,4	- 73,1
40	- 7,4	- 14,1	- 20,8	- 27,4	- 34,1	- 40,8	- 47,5	- 54,2	- 60,9	- 67,6	- 74,2
45	- 7,8	- 14,5	- 21,3	- 28,0	- 34,8	- 41,5	- 48,3	- 55,1	- 61,8	- 68,6	- 75,3
50	- 8,1	- 15,0	- 21,8	- 28,6	- 35,4	- 42,2	- 49,0	- 55,8	- 62,7	- 69,5	- 76,3
55	- 8,5	- 15,3	- 22,2	- 29,1	- 36,0	- 42,8	- 49,7	- 56,6	- 63,4	- 70,3	- 77,2
60	- 8,8	- 15,7	- 22,6	- 29,5	- 36,5	- 43,4	- 50,3	- 57,2	- 64,2	- 71,1	- 78,0
65	- 9,1	- 16,0	- 23,0	- 30,0	- 36,9	- 43,9	- 50,9	- 57,9	- 64,8	- 71,8	- 78,8
70	- 9,3	- 16,3	- 23,4	- 30,4	- 37,4	- 44,4	- 51,4	- 58,5	- 65,5	- 72,5	- 79,5
75	- 9,6	- 16,6	- 23,7	- 30,8	- 37,8	- 44,9	- 51,9	- 59,0	- 66,1	- 73,1	- 80,2
80	- 9,8	- 16,9	- 24,0	- 31,1	- 38,2	- 45,3	- 52,4	- 59,5	- 66,6	- 73,7	- 80,8
85	- 10,0	- 17,2	- 24,3	- 31,5	- 38,6	- 45,7	- 52,9	- 60,0	- 67,2	- 74,3	- 81,5
90	- 10,2	- 17,4	- 24,6	- 31,8	- 39,0	- 46,1	- 53,3	- 60,5	- 67,7	- 74,9	- 82,0

Par exemple, à une température extérieure de - 10 °C par un vent de 30 km/h, l'indice éolien est d'environ - 20 °C ; ce qui équivaut à une perte thermique par le corps à une température extérieure de - 20 °C sans vent.

4.3. Le confort thermique

Lorsqu'aucune contrainte thermique ne ressort des analyses des normes citées précédemment et des observations en entreprise, et qu'aucun trouble majeur sur la santé des travailleurs n'a été constaté, il peut être nécessaire d'estimer le niveau d'inconfort.

Le confort thermique est la sensation de bien-être perçue lorsqu'on est exposé à une ambiance thermique modérée. Les sensations thermiques du corps humain sont liées principalement à son équilibre dans sa globalité. En connaissant l'ensemble des facteurs l'impactant, la sensation thermique du corps peut être prédite en calculant deux indices : le vote moyen prévisible (PMV pour *Predicted Mean Vote*) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD pour *Predicted Percentage of Dissatisfied*). Ces indices renseignent sur l'inconfort thermique global, en estimant le pourcentage de personnes ayant trop chaud ou trop froid. Mais l'insatisfaction thermique peut également résulter d'un refroidissement ou réchauffement local non désiré du corps : c'est l'inconfort thermique local. Une attention particulière devra y être apportée.

4.3.1 Confort thermique global

■ Le vote moyen prévisible : PMV

Le PMV (voir figure 7) est un indice qui donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur une échelle à sept niveaux. Il est basé sur le bilan thermique du corps humain, qui est équilibré lorsque la production interne de chaleur dans le corps est égale à la perte de chaleur vers l'ambiance.

Cette méthode basée sur le PMV est décrite dans la norme NF EN ISO 7730 : 2005. Elle n'est valable que dans des conditions d'ambiances modérées représentées par des intervalles bornés pour chacun des six paramètres entrant en ligne de compte détaillés dans le tableau 9.

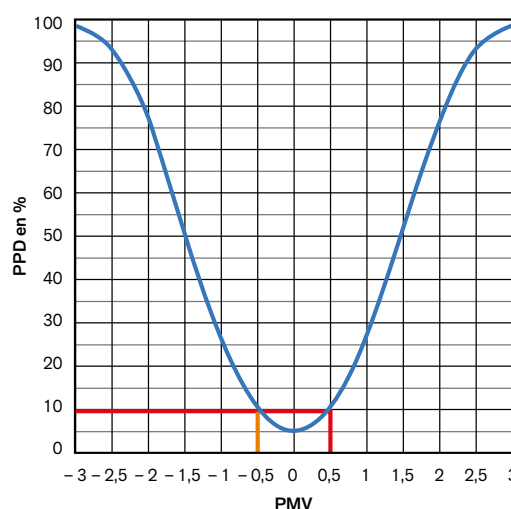
■ Le pourcentage prévisible d'insatisfaits : PPD

Le PPD établit une prévision quantitative du pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement correspondant à un PMV de sensation thermique donné. Il se calcule grâce à la relation suivante issue de la norme NF EN ISO 7730 : 2005 :

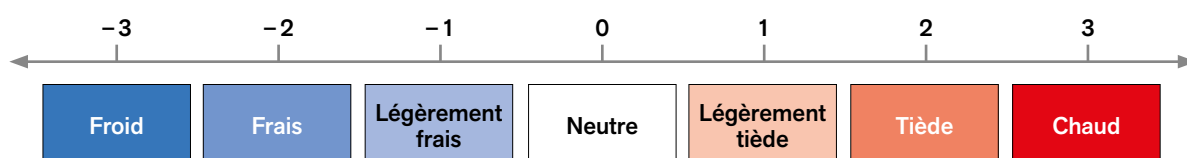
$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)}$$

Par exemple : Pour un PMV de $\pm 0,5$, environ 10 % des personnes sont insatisfaites de leur environnement.

On notera que même à la neutralité, il reste 5 % des personnes qui peuvent ne pas être satisfaites de l'environnement thermique dans lequel elles se trouvent. Ceci est dû à la dispersion interindividuelle, puisque ce modèle est basé sur une approche statistique et subjective.



■ Figure 8. Évolution du PPD en fonction du PVM



■ Figure 7. Échelle de sensation thermique du PMV

Tableau 9. Plages de validité du modèle PMV-PPD pour les différents paramètres du modèle issu de la norme NF EN ISO 7730 : 2005

Plages de validité du modèle PMV-PPD			
Paramètres	Unités	Minimum	Maximum
Température de l'air	°C	10	30
Pression partielle de vapeur d'eau	kPa	0	2,7
Température de rayonnement	°C	10	40
Vitesse d'air	m.s ⁻¹	0	1
Métabolisme	W.m ⁻²	46	232
Isolement vestimentaire	clo	0	2

4.3.2. L'inconfort thermique local

L'inconfort thermique peut être localisé à une seule partie du corps, le plus souvent en raison de la présence de courants d'air. Mais l'inconfort local peut également être causé par une différence verticale de température entre la tête et les chevilles anormalement grande (stratification des températures), par un sol trop chaud ou trop froid ou par une asymétrie excessive de température de rayonnement.

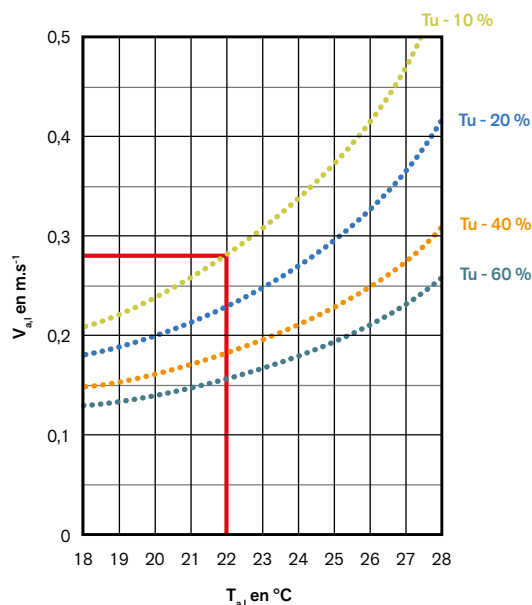
La gêne par courant d'air

La gêne par courant d'air peut être exprimée par le pourcentage prévisible de la population se déclarant dérangé par ce courant d'air.

Son estimation repose sur la mesure de :

- la température locale de l'air $T_{a,l}$; la vitesse locale moyenne de l'air $V_{a,l}$;
- l'intensité locale de turbulence (Tu), calculée en fonction des écarts-types de vitesses locales d'air $\sigma_{V_{a,l}}$.

Le modèle permet de prédire des gênes par courant d'air (DR : *Draught Rate*) au niveau du cou. Il s'applique aux personnes réalisant des activités légères, essentiellement sédentaires, et qui ont une sensation thermique pour le corps entier proche de la neutralité.



■ Figure 9. Exemple de couples ($V_{a,l}$; $T_{a,l}$) en fonction d'une turbulence Tu donnée pour obtenir un DR de 20 % d'insatisfaits

$$DR = (34 - T_{a,l})(V_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37.V_{a,l}.Tu + 3,14)$$

Si $V_{a,l} < 0,05$ m/s, utiliser $V_{a,l} = 0,05$ m/s

Si $DR > 100$ %, utiliser $DR = 100$ %

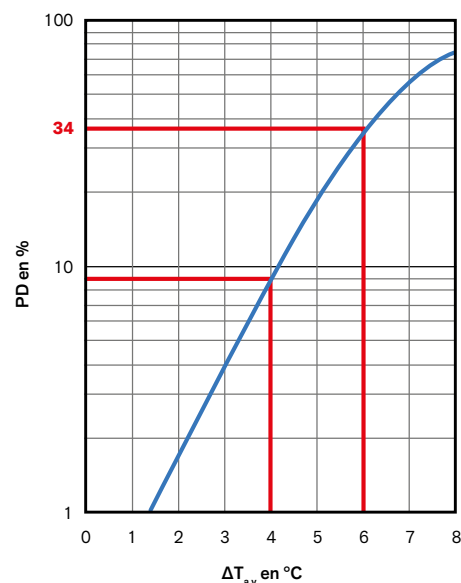
$$\text{Avec } Tu = \frac{\sigma_{V_{a,l}}}{V_{a,l}} \times 100$$

Par exemple, à 22 °C pour une intensité locale de turbulence Tu de 10 % (faibles variations de la vitesse d'air), la vitesse d'air moyenne ne devra pas dépasser 0,28 m/s pour rester en dessous de 20 % d'insatisfaits. En revanche, pour une valeur Tu de 60 % (fortes variations de la vitesse), la vitesse d'air moyenne ne devra pas dépasser 0,16 m/s (voir figure 9).

La stratification des températures

Un inconfort local peut être induit par un grand écart de température d'air entre la tête et les chevilles. Son estimation repose sur la mesure de cet écart : $\Delta T_{a,v}$. Un modèle permet de prédire le pourcentage de personnes insatisfaites (PD) par une gêne due à une élévation de la température entre les chevilles et la tête, c'est-à-dire une température plus basse près des pieds. Dans le cas contraire, lorsqu'à l'inverse la température au niveau de la tête est plus basse que celle au niveau des chevilles les personnes sont moins sujettes à des inconforts de ce type.

$$PD = \frac{100}{1 + \exp^{(5,76 - 0,856 \times \Delta T_{a,v})}}$$



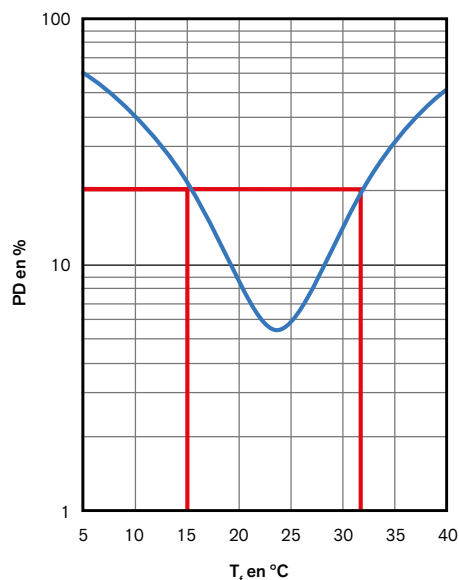
■ Figure 10. Nombre d'insatisfaits en fonction de l'écart de température tête/cheville

Par exemple, pour un écart de 4 °C entre les pieds et la tête, près de 9 % des personnes jugeront cette situation inconfortable, alors qu'un écart de 6 °C conduirait à un inconfort pour 34 % de personnes (voir figure 10 p. précédente).

■ Sols chauds ou froids

Un sol trop chaud ou trop froid peut rendre inconfortable une situation de travail par la sensation thermique générée au niveau des jambes. Un modèle permet de prédire des gênes en fonction de la température de surface du sol : T_s . Il est valable dans le cas de personnes sédentaires. Le pourcentage d'insatisfaits est exprimé en %.

$$PD = 100 - 94 \times \exp(-1,387 + 0,118 \times T_s - 0,0025 \times T_s^2)$$



■ Figure 11. Nombre d'insatisfaits en fonction de la température du sol

Par exemple, environ 20 % des personnes jugeront inconfortable un sol à 15 °C ou un sol à 32 °C (voir figure 11).

■ Asymétrie de température de rayonnement

Une différence de rayonnement thermique des parois opposées d'un local (plafond/sol ; mur/mur opposé) peut générer un inconfort pour ses occupants. Le modèle permet de prédire des gênes en fonction de l'asymétrie de température de rayonnement ΔT_{pr} ; le pourcentage d'insatisfaits (PD) prédit par le modèle adéquat est exprimé en %.

Cette asymétrie est mesurée au moyen d'une sonde plane de rayonnement telle que décrite dans la norme NF EN ISO 7726 : 2002 permettant d'évaluer les températures de rayonnement en provenance de deux parois opposées.

Cas du plafond chaud :
Pour $\Delta T_{pr} < 23$ °C

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \times \Delta T_{pr})} - 5,5$$

Cas du mur froid :
Pour $\Delta T_{pr} < 15$ °C

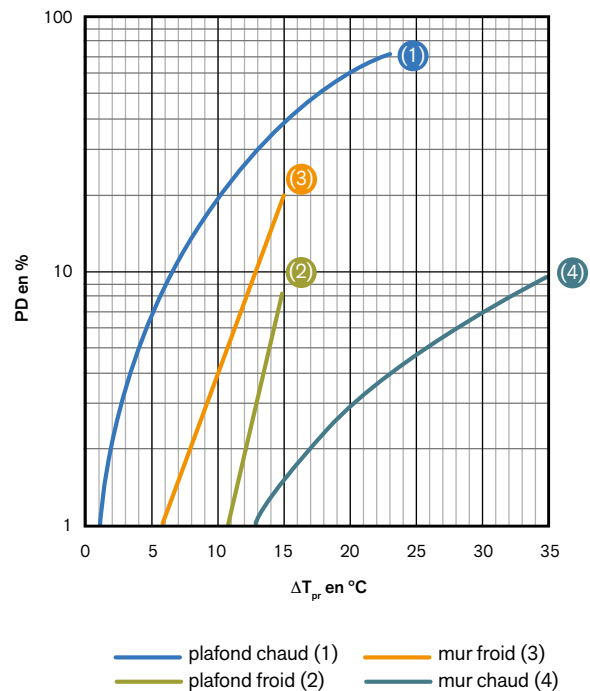
$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \times \Delta T_{pr})}$$

Cas du plafond froid :
Pour $\Delta T_{pr} < 15$ °C

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 \times \Delta T_{pr})}$$

Cas du mur chaud :
Pour $\Delta T_{pr} < 35$ °C

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \times \Delta T_{pr})} - 3,5$$



■ Figure 12. Nombre d'insatisfaits en fonction de l'asymétrie de température de rayonnement

Par exemple, dans le cas d'une asymétrie de température de rayonnement de 13 °C, lorsque celle-ci est induite par un plafond chaud 30 % des personnes seront en situation d'inconfort, si elle est induite par un mur froid l'inconfort concernera plus de 10 % des personnes, par un plafond froid seulement 3 % des personnes sont en situation d'inconfort et 1 % s'il s'agit d'un mur plus chaud (voir figure 12).

4.3.3 L'interprétation

Ces différentes grandeurs (PMV/PPD ; DR ; $\Delta T_{a,v}$; T_f ; ΔT_{pr}) permettent de juger une situation globale ou des inconforts locaux suivant trois catégories d'ambiance thermique de la plus confortable (catégorie A) à la moins confortable (catégorie C), détaillées dans le tableau 10.

Il est recommandé d'assurer une ambiance thermique de catégorie B au minimum pour les locaux tertiaires (bureaux) et C au minimum pour les locaux industriels (ex. : atelier).

Tableau 10. Catégorie d'ambiance thermique

Catégorie d'ambiance souhaitée	État thermique du corps dans son ensemble			Inconfort local		
	PPD en %	PMV	DR en %	PD en %		
				Différence verticale de température de l'air	Sol chaud ou froid	Asymétrie de la température de rayonnement
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10



5. Proposer des actions de prévention

Toute démarche de prévention des risques professionnels doit être conduite en impliquant tous les acteurs concernés et en s'appuyant sur les neuf principes généraux de prévention prévus par le Code du travail. Ces mesures s'inscrivent dans la perspective d'une démarche globale, conçue le plus en amont possible, dès le choix des procédés et la conception des locaux, en passant par des mesures d'organisation du travail, d'information et de formation. Dans une situation de contrainte thermique, qu'il s'agisse de contrainte froide ou chaude, on peut distinguer deux 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, et les actions organisationnelles qui visent à agir sur la situation de travail.

5.1 Les actions techniques

Les actions techniques vont directement impacter les différents paramètres intervenant dans le bilan

thermique du corps humain. 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 sur ces six grandeurs peuvent, selon les situations de travail rencontrées, être conduites en utilisant différents leviers. On s'attachera cependant, autant que faire se peut, à mettre en œuvre des solutions de prévention collectives en premier lieu.

En ambiance thermique, on cherchera tout d'abord à proposer des solutions permettant de réduire les apports ou les déperditions de chaleur, ensuite on visera à limiter les transferts thermiques de la source vers le salarié, et enfin, si ces solutions ne sont pas suffisamment efficaces ou si elles doivent être complétées, on proposera des solutions de prévention plus individuelles. Ce cheminement d'actions à proposer peut-être synthétisé par le schéma ci-dessous.



Les actions de prévention à mettre en place, qu'elles concernent les sources thermiques, la limitation des transferts ou le travailleur, vont se décliner différemment en fonction du contexte chaud ou froid, mais aussi en fonction des grandeurs clés sur lesquelles il sera nécessaire d'agir.

De nombreuses solutions peuvent être mises en place et dépendent du contexte. Néanmoins, quelques exemples sont donnés dans la figure 13 selon qu'ils concernent une action sur les sources, sur le transfert thermique ou au niveau du travailleur.

Les solutions peuvent être nombreuses et combinées entre elles.

5.2. Les actions organisationnelles et la sensibilisation des salariés

À la différence des actions techniques qui vont directement impacter l'un ou l'autre des six échanges de chaleur participant au bilan thermique du corps, les actions organisationnelles vont directement impacter la situation de travail. Outre l'action directe sur l'organisation de la tâche et du travail, l'information et la formation des salariés sont nécessaires dans ce contexte. Ces actions organisationnelles peuvent se décliner différemment si elles sont applicables à l'exposition à la chaleur ou au froid. Néanmoins certaines actions contribuant à la réduction des risques sont communes aux deux expositions. Il s'agit notamment de :

- planifier l'activité de façon à éviter le travail en conditions d'ambiances thermiques extrêmes (ex. : vagues de chaleur, interventions sur des installations chaudes, froid extrême...);
- augmenter la fréquence des pauses de récupération dans des locaux adaptés (locaux frais ou chauffés selon le type d'exposition);
- limiter le temps d'exposition du salarié en effectuant des rotations de personnel si possible;
- 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;
- prendre en compte et organiser la période d'acclimatation;
- apporter une vigilance particulière dans certaines situations de travail, comme : les espaces clos, les locaux où les salariés doivent être en contact avec des surfaces métalliques ou réfléchissantes, etc.

En termes d'information et de formation, il est recommandé de :

- signaler les zones extrêmes (entrée dans une zone chaude ou de basse température, surgélation, contact possible avec des surfaces chaudes, etc.);
- surveiller en continu les températures extrêmes;
- afficher les recommandations et former aux gestes de premiers secours;
- organiser des formations spécifiques aux métiers ou activités : formation espaces confinés, amiante...

Actions menées sur la **SOURCE**

- Modification des procédés
- Réduction de la puissance des sources
- Déplacement de la source dans un local dédié
- ...

Actions limitant les **TRANSFERTS THERMIQUES**

- Captage (chaleur, humidité)
- Ventilation du poste de travail
- Positionnement d'écrans ou isolation des sources thermiques
- Éloignement de l'opérateur par mécanisation des tâches ou mise à distance des commandes
- Isolation du bâtiment
- Ventilation générale du bâtiment
- Rafraîchissement/ Chauffage
- Aménagement de cabine de protection
- ...

Actions au niveau du **TRAVAILLEUR**

- Adaptation de la tenue de travail
- Port d'EPI adaptés au contexte (vêtements isolants, réfléchissants, rafraîchissants...)
- Réduction de la charge physique en mécanisant certaines tâches
- ...

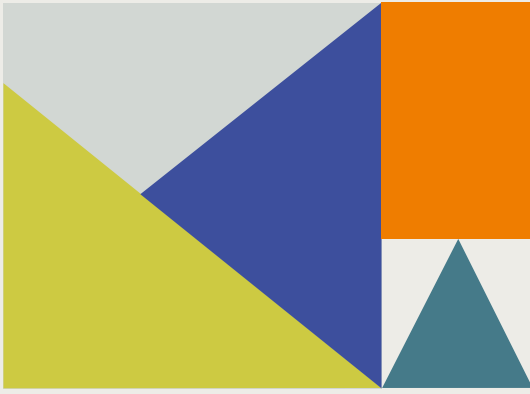
■ Figure 13. Exemples de solutions de prévention

Dans le cas particulier de travail lors de vagues de chaleur, 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 comme : limiter ou reporter le travail physique, aménager les horaires de travail en favorisant les heures les moins chaudes de la journée, mettre en œuvre des adaptations techniques pour limiter les effets de la chaleur (abris en extérieur, ventilateur, brumisateurs, volets, stores), fournir des vêtements de travail adaptés à la situation, prévoir des sources d'eau potable rafraîchie à proximité des postes de travail de façon à boire régulièrement, des aires de repos ombragées ou climatisées, informer les salariés sur les risques liés à la chaleur notamment les signes d'alerte du coup de chaleur et les mesures de premier secours. Dans les bureaux, il est préconisé d'arrêter ou de limiter l'utilisation des imprimantes, photocopieurs, et toute autre source additionnelle de chaleur.

D'autres mesures comportementales sont susceptibles elles aussi de diminuer les risques liés à une ambiance chaude comme : porter des vêtements adaptés au poste de travail et de préférence amples, légers, de couleur claire, favorisant l'évaporation de la sueur, se protéger la tête du soleil, éviter les repas copieux, les boissons alcoolisées, le tabac et les substances psychoactives. Enfin, les salariés doivent être informés de l'impératif de cesser immédiatement toute activité si des symptômes de malaise (crampes, fatigue, nausées, étourdissement, maux de tête) apparaissent et de le signaler par une « procédure d'alerte » sans tarder.

Il existe un décret 2024-630 du 28 juin 2024 qui permet l'indemnisation des salariés par les entreprises du BTP en cas d'arrêt de travail occasionné par la canicule.

Conseil : Les outils d'évaluation des contraintes présentés ci-avant (ATP, IREQ ou PMV-PPD) peuvent être très utiles pour connaître l'impact d'une solution de prévention à proposer ou pour estimer sur quel paramètre il est le plus judicieux d'intervenir. En effet, il est possible en ajustant la valeur d'une grandeur de voir l'effet qu'elle induira sur les durées limites d'exposition et ainsi proposer une solution de prévention ayant un effet directement en relation avec cette grandeur.



6. Fiches techniques

Fiche 1. Formules utiles et relations entre grandeurs

Température moyenne de rayonnement pour un globe noir de 15 cm de diamètre (exprimée en °C)

$$T_r = [(T_a + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \times (V_a^{0,6}) \times (T_g - T_a)]^{0,25} - 273$$

Cette formule est valable pour un globe noir de diamètre 15 cm dans des conditions de convection forcée (vitesse d'air non nulle). Pour tout autre diamètre de globe noir, il est nécessaire d'appliquer une correction pour prendre en compte le diamètre du globe.

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \times V_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{0,25} - 273$$

En cas de convection naturelle (pas de déplacement d'air, vitesse d'air nulle), la température moyenne de rayonnement s'exprime comme :

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \times \left(\frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{0,25} \times (T_g - T_a) \right]^{0,25} - 273$$

Relation entre pression partielle de vapeur d'eau (P_a), humidité absolue (W_a) et humidité relative (HR) de l'air

On utilise généralement le diagramme de l'air humide, également appelé diagramme psychrométrique, pour estimer les caractéristiques de l'air. Les diagrammes de l'air humide sont généralement établis pour une pression atmosphérique normale de 101 325 Pa et pour des températures de l'air comprises entre 20 °C à 50 °C. Il existe plusieurs types de diagrammes, les plus utilisés sont ceux comportant en abscisse les températures de l'air sec, et en ordonnée les humidités absolues (W_a) doublées de la pression de vapeur d'eau (P_a). On trouve généralement l'humidité relative sur les courbes de gauche, la courbe à l'extrême gauche correspondant à la saturation, soit 100 % d'humidité relative.

La pression partielle de vapeur (P_a), l'humidité absolue (W_a) et l'humidité relative (HR) sont trois grandeurs qui expriment la quantité d'eau présente dans l'air. Elles peuvent être déduites d'un diagramme de l'air humide.

Fiche 2. La convection thermique

La convection thermique est un transfert de chaleur qui s'opère entre un solide et un fluide à des températures différentes. Dans le cas d'une personne, il s'agit de l'échange de chaleur entre sa surface corporelle et l'air qui l'entoure, plus rarement de l'eau.

Cet échange est proportionnel :

- à la différence de température existant entre la personne et l'air ;
- à la vitesse de l'air autour de la personne ;
- aux caractéristiques du vêtement porté.

La température

Si la température cutanée, ou la température extérieure du vêtement porté est supérieure à la température de l'air (T_a), alors l'air en contact avec l'individu se réchauffe et le salarié perd de la chaleur. Dans ce cas l'échange convectif tend à refroidir l'individu. Dans les cas où au contraire, l'individu est placé dans un environnement où l'air est plus chaud que sa température corporelle ou celle de son vêtement, le transfert de chaleur convectif provient de l'air vers le sujet ; ce dernier se réchauffe. La température cutanée varie entre 33 et 35 °C.

Les échanges par convection peuvent donc représenter une perte ou un apport de chaleur. En convection, toute la surface exposée échange avec son environnement.

La vitesse de l'air

La différence de température entre le corps et l'air environnant va induire un mouvement d'air par différence de masse volumique du fluide. Si l'air se réchauffe, il va naturellement s'élever, cette circulation d'air induite est appelée convection naturelle et s'établit à la surface du corps.

Lors de l'emploi de ventilateurs, ou dans le cas de circulation de l'individu (marche, course, utilisation de véhicules ouverts), la vitesse de l'air autour du salarié devient plus importante. On parle de convection forcée. Dans ce cas, les échanges de chaleur sont plus significatifs.

Les caractéristiques du vêtement

L'isolation thermique du vêtement permet de réduire les échanges de chaleur par convection. Si l'isolement thermique du vêtement est nul (peau nue) alors la totalité de la surface du corps peut participer aux échanges de chaleur par convection. Au contraire, si l'isolement de la tenue vestimentaire est très important, le flux convectif est très limité ; la température externe du vêtement étant proche de celle de l'air.

Fiche 3. La conduction thermique

La conduction thermique est la transmission de chaleur entre deux solides en contact ou au sein d'un même solide, à des températures de surface différentes. Dans le cas d'une exposition professionnelle, les échanges par conduction concernent des échanges entre le corps et un objet : préhension et manutention d'objets, assises, poignées, chaussures...

Sauf dans des cas particuliers, ils ne concernent que de faibles fractions du corps humain et concernent peu de salariés. La conduction a donc très peu d'impact sur le bilan thermique du corps humain ; elle y est négligée.

Cependant, certaines situations de travail auraient un impact important sur le bilan thermique, mais il est difficile de l'évaluer, par exemple la préhension de gros objets congelés à bras le corps, qu'il convient d'éviter en privilégiant l'usage d'un équipement de manutention.

Fiche 4. Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un échange de chaleur entre deux solides à des températures différentes, mais sans aucun contact, par rayonnement infrarouge. Le soleil ou des surfaces étendues telles qu'un plan d'eau, un sol enneigé ou un ciel nuageux participent au rayonnement thermique.

La caractérisation du rayonnement thermique repose sur la propriété suivante : tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont l'intensité est fonction de la quatrième puissance de sa température absolue.

Un individu dont la température de peau peut se situer entre 33 et 35 °C émet un tel rayonnement. Il reçoit en outre le rayonnement électromagnétique de toutes les surfaces qui l'entourent. En rayonnement thermique, on parle de flux net échangé entre le sujet et son environnement.

Ce flux net est fonction :

- des températures du corps et de celles des surfaces qui l'entourent ;
- de la fraction du corps exposée à une surface donnée, on parle de facteur de forme ;
- de la nature des vêtements de travail.

Les températures

Une personne dans un environnement donné est entourée par une multitude de surfaces qui sont à des températures différentes (mur, sol, paroi vitrée, four, mobilier, équipements informatiques divers, procédés...). Pour faciliter l'estimation des échanges radiatifs, on considère une température moyenne unique de rayonnement qui est la résultante de toutes les températures de rayonnement des surfaces environnantes. Elle se mesure à l'aide d'un globe noir.

Étant donné que la température du corps humain varie dans une plage très réduite, le flux par rayonnement est directement proportionnel à l'écart entre la température du sujet et la température moyenne de rayonnement T_r . Plus cet écart est important et plus l'échange radiatif impacte le bilan thermique de la personne.

La fraction du corps exposée ou les surfaces d'échange

Selon la position de travail du salarié, une fraction plus ou moins importante participera aux échanges par rayonnement. Cela est pris en compte par le ratio de la surface soumise au rayonnement sur la surface totale du corps. Les normes NF EN ISO 7730 : 2005 et NF EN ISO 7933 : 2023 prévoient les facteurs suivants selon que le salarié est debout : 0,77 ; assis : 0,70 ou accroupi : 0,67.

La nature des vêtements de travail

Les caractéristiques des vêtements de travail impactent les échanges. En effet, selon la nature des vêtements portés, le flux par rayonnement arrivant sur un sujet est plus ou moins absorbé et participe aux échanges ou est réfléchi.

La méthode de ce guide ne s'applique pas dans le cas de vêtements de travail très spéciaux comme des tenues entièrement réfléchissantes, réfrigérées et ventilées, imperméables, ou avec un équipement individuel de protection.

Fiche 5. La respiration

L'inspiration et l'expiration de l'air s'accompagnent d'un échange de chaleur en même temps que d'un échange de matière (vapeur d'eau). Cet échange thermique avec le milieu ambiant se présente sous deux formes :

- par variation de température (échange de chaleur, dite par chaleur sensible) ;
- par variation de la teneur en eau (échange de chaleur, dite chaleur latente de vaporisation).

Remarque : Cet air est saturé en humidité (100 % de vapeur d'eau) et a une température de 34 °C.

Les échanges par chaleur sensible ou échanges de chaleur entre l'air respiré et l'air ambiant

Ces échanges vont dépendre de la différence entre les températures de l'air respiré et ambiant, mais aussi de la quantité d'air échangé à travers le débit ventilatoire. Les échanges par chaleur sensible peuvent représenter une perte ou un apport de chaleur selon que la température de l'air est inférieure ou supérieure à 34 °C.

Les échanges par chaleur latente ou échanges de vapeur d'eau entre l'air respiré et l'air ambiant

Ces échanges vont dépendre de la différence d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant ainsi que du débit ventilatoire. À l'exception de cas extrêmement rares (enceinte chauffée contenant de l'eau, fuite massive de vapeur d'eau), les échanges par chaleur latente sont généralement une perte de chaleur pour le corps puisque l'air exhalé est saturé en humidité, soit 100 % d'humidité relative.

On retiendra que la respiration participe au bilan thermique dans un environnement donné et qu'elle est directement impactée par :

- l'activité métabolique du salarié : le débit respiratoire mis en œuvre est la conséquence de l'activité métabolique du sujet. Un métabolisme élevé entraînera un débit respiratoire plus important ;
- la température de l'air ambiant et son humidité : plus l'air ambiant est froid et sec, plus les pertes thermiques par la respiration sont élevées.

Fiche 6. L'évaporation de la sueur

Au niveau cutané, la sudation, quand elle se produit, permet une déperdition calorique évaporatoire importante. En effet, le passage des molécules d'eau de l'état liquide (sueur) à l'état gazeux (vapeur) se traduit par une consommation d'énergie importante, permettant au corps de se refroidir.

Cet échange de chaleur dépend :

- de la différence d'humidité entre l'air et la couche de vapeur d'eau à la surface de la peau induite par la sueur ;
- de la fraction de surface corporelle correspondant aux zones de sudation et qui sont en contact avec l'air ;
- du vêtement porté notamment à travers sa perméabilité et sa capacité à diffuser la sueur à l'extérieur. Si le vêtement est très perméable, l'évaporation de la sueur peut être efficace. Au contraire si la perméabilité du vêtement est nulle (vêtement très étanche à la vapeur d'eau), l'évaporation ne peut pas avoir lieu ;
- de la vitesse de l'air autour du sujet, qui va augmenter les échanges.

L'évaporation de la sueur représente toujours une perte de chaleur pour l'individu. C'est un mécanisme prépondérant, qui permet au corps de réguler sa température interne en évitant une accumulation de chaleur corporelle.

Attention, certains sujets peuvent présenter soit une hyposudation soit une hypersudation qui modifiera leur réponse physiologique à une exposition.

Bibliographie



Références

Norme NF EN ISO 9886 : 2004 : « Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques », Afnor.

Norme NF EN ISO 7726 : 2002 : « Ergonomie des ambiances thermiques. Appareils de mesure des grandeurs physiques », Afnor.

Norme NF EN ISO 8996 : 2021 : « Ergonomie de l'environnement thermique. Détermination du métabolisme énergétique », Afnor.

Norme NF EN ISO 9920 : 2007 : « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire », Afnor.

Norme NF EN ISO 7933 : 2023 : « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible », Afnor.

OMS, Health factors involved in working under conditions of heat stress. WHO Scientific Group on Health Factors Involved In Working under Conditions of Heat Stress, Genève, OMS, 1969, Technical report n° 412.

Norme NF EN ISO 11079 : 2007 : « Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination et interprétation de la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis du vêtement (IREQ) et les effets du refroidissement local », Afnor.

Norme NF EN ISO 7730 : 2005 : « 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 », Afnor.

Pour en savoir plus

Documents disponibles sur www.inrs.fr

Travailler dans une ambiance thermique froide, article tiré de la revue *Références en santé au travail*, TC 167.

Travailler dans une ambiance thermique chaude, article tiré de la revue *Références en santé au travail*, TC 165.

Dossiers web « Travail à la chaleur » et « Travail au froid ».

Travailler dans des ambiances thermiques chaudes ou froides : quelle prévention ?, dossier tiré de la revue *Hygiène et sécurité du travail*, DO 29.

Toutes les publications de l'INRS sont téléchargeables sur 
www.inrs.fr

**Pour commander les publications de l'INRS au format papier **

Les entreprises du régime général de la Sécurité sociale peuvent se procurer les publications de l'INRS à titre gratuit auprès des services prévention des Carsat/Cramif/CGSS.

Retrouvez leurs coordonnées sur www.inrs.fr/reseau-am

L'INRS propose un service de commande en ligne pour les publications et affiches, payant au-delà de deux documents par commande.

Les entreprises hors régime général de la Sécurité sociale peuvent acheter directement les publications auprès de l'INRS en s'adressant au service diffusion par mail à service.diffusion@inrs.fr

Ce guide décrit la démarche à conduire pour évaluer les risques et inconforts liés aux ambiances thermiques sur les postes de travail. Il s'adresse aux chefs d'entreprise, services de prévention et de santé au travail et préventeurs.

Sont détaillées les différentes étapes à conduire depuis l'analyse de la situation, l'évaluation des paramètres clés, l'utilisation et l'interprétation de modèles d'évaluation des contraintes thermiques et inconforts, qu'il s'agisse d'une situation d'exposition à la chaleur ou au froid. Des actions de prévention et des fiches techniques sont également proposées à la fin de ce guide.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail
et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris
Tél. 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 6532

1^{re} édition | novembre 2024 | ISBN 978-2-7389-2907-5 | Disponible uniquement au format web

L'INRS est financé par la Sécurité sociale
Assurance maladie - Risques professionnels

www.inrs.fr   