



Université de la méditerranée



DESS Prévention des
risques et nuisances
technologiques

Ambiance Thermique

Notions de confort thermique



Unité 5 : Facteurs d'ambiance – M. ATHUYT
Promotion 2003/2004

Jérôme CHOUDIN
Cédric MORICE
Nadjia KECHICH

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	2
1 CONTEXTE.....	4
1.1 La réglementation.....	4
1.2 Référentiels.....	4
2 NOTIONS DE BASE SUR LES AMBIANCES THERMIQUES	5
2.1 L'homéothermie.....	5
2.2 Lutte physiologique contre les ambiances chaudes et froides.....	8
2.3 Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides.....	10
3 MÉTHODES D'ANALYSES DES AMBIANCES CHAUDES.....	11
3.1 Confort thermique et neutralité thermique.....	11
3.2 Evaluation de la contrainte thermique.....	13
3.3 Détermination analytique de la contrainte thermique par l'indice de la sudation requis.....	17
4 MÉTHODES D'ANALYSES DES AMBIANCES FROIDES	18
4.4 Isolement vestimentaire.....	18
4.5 Indice de refroidissement (WCI)	19
5 RÉDUCTION DE LA CONTRAINTE	20
5.1 Eliminer les risques.....	20
5.2 Réduire la contrainte thermique dans les ateliers.....	20
5.3 Promouvoir l'hygiène alimentaire.....	21
6 RÉGLEMENTATION	23
5.1 Les normes.....	23
5.2 L'arrêté du 13 avril 1988.....	23
5.3 La RT 2000 : un aspect à considérer	24
7 CONCEPTION TECHNIQUE DES LOCAUX	27
6.1 Quelques repères à prendre en compte :	27
6.2 Matériaux isolants.....	29
6.3 Solutions existantes pour l'isolation d'un local industriel.....	31
8 DES NOUVELLES TECHNIQUES QUI SE VEULENT « ÉCOLOGIQUES »	34
6.4 L'isolation BIO.....	34
6.5 La démarche HQE	34
CONCLUSION.....	38
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

INTRODUCTION

L'ambiance thermique est un facteur de conditions de travail jouant un rôle important sur la santé, la sécurité et le confort des travailleurs. Cela concerne aussi bien les situations de chaleur que de froid.

Les ambiances physiques d'inconfort sont très courantes en milieu professionnel. On exprime assez facilement et spontanément les sensations éprouvées face à l'ambiance thermique à laquelle on est soumis : sensation de chaleur, d'étouffement et de froid, associés à des effets caractéristiques tels que la transpiration, le frissonnement... Ces premiers symptômes doivent attirer l'attention du médecin du travail et du responsable Hygiène Sécurité Environnement et conduire à une analyse complète.

L'évaluation du risque ambiance thermique au poste de travail est une étape délicate. La réglementation impose à l'employeur d'assurer la protection de ses employés au travers d'une analyse des risques annuel ou lors de toute modification du poste de travail (Article L.230-2 et R.230-1 du code du travail). Le facteur ambiance thermique doit être ainsi pris en compte, évalué et maîtrisé.

Dans ce but, nous nous attacherons à vous présenter les méthodes d'évaluation normatives existantes. Celles-ci sont basées sur deux types d'évaluations, une approche subjective de nos sensations (notion de confort thermique) et une approche analytique approfondie de l'environnement de travail, basée sur la réaction physiologique du sujet (notion de neutralité thermique).

Enfin, une présentation sommaire des techniques d'isolation existantes constituera la dernière partie de notre rapport.

Partie I :

NOTION DE CONFORT THERMIQUE

1 CONTEXTE

1.1 La réglementation (cf. Annexe n°1)

- Article L. 230-2 du code du travail
- Article R. 230-1 du code du travail
- Article R. 235-2-9 du code du travail
- Circulaire 14 avril 1995

1.2 Référentiels

1.2.1 Normes AFNOR

- **Norme NF X 35-20 mars 1984 ISO 7243**
Relative à l'évaluation simplifiée des contraintes thermiques des lieux de travail par l'indice WBGT (Wet Bulb Globe Température).
- **Norme NF X 35-204 de décembre 1982**
Relative à la détermination analytique de la contrainte thermique.
- **Norme NF X 35-203 de décembre 1981**
Relative au confort thermique.

1.2.2 Projet de norme ISO

ISO/DIS 13731 du 19 décembre 1996 relative à l'ergonomie des ambiances thermiques et aux définitions, symboles et unités.

2 NOTIONS DE BASE SUR LES AMBIANCES THERMIQUES

2.1 L'homéothermie

2.1.1 Définition

L'homme est un homéotherme, c'est-à-dire que sa température centrale est stabilisée à environ 37°C, en dépit des variations de la température extérieure. Il s'agit d'un équilibre entre la **thermogenèse** (production de chaleur) et la **thermolyse** (perte de chaleur).

Cet équilibre permet les performances biologiques, mentales et physiques optimales. Le centre de la thermorégulation se situe dans l'hypothalamus.

2.1.2 Thermogenèse : Production de chaleur

C'est la somme des chaleurs produites par l'organisme par :

- Le métabolisme de base :
Dépense énergétique de l'organisme à la température de neutralité thermique ou à l'état de repos.
- L'exercice musculaire :
Dépense énergétique dû à l'activité de travail.
- Les métabolismes ajoutés :
Particulièrement la digestion.

2.1.3 Thermolyse : Perte de chaleur

La thermolyse correspond aux échanges de chaleur entre l'organisme et l'environnement. Ce sont, en générale, des mécanismes qui permettent à l'organisme d'évacuer la chaleur excédentaire à condition que l'environnement le permette.

Quand l'environnement est défavorable (taux d'humidité important, absence de ventilation...), ces mécanismes ne sont plus efficaces et entraînent un stockage de la chaleur excédentaire pouvant engendrer des pathologies à plus ou moins long terme.

Il existe 4 types de mécanismes quantifiables au travers de la **Norme NFX 35-204 de décembre 1982**, permettant d'évaluer la contrainte thermique s'exerçant sur l'opérateur.

La conduction

C'est l'échange de chaleur entre deux corps solides en contact, ici l'organisme est apparenté à un solide quelconque.

Elle dépend de :

- La différence de température entre les deux corps : la chaleur allant toujours du corps le plus chaud vers le corps plus froid,
- La conductivité thermique du solide en contact,
- L'épaisseur du solide,
- La surface de contact entre la peau et le solide.

Le mécanisme de conduction est généralement négligé dans l'évaluation de la contrainte thermique. Le fait que les opérateurs soient habillés la rend négligeable face aux autres mécanismes.

La convection ($W^2.m^2$)

C'est l'échange de chaleur entre l'organisme et le fluide qui l'entoure (liquide ou gaz). Elle dépend de :

- La vitesse du fluide :
Selon la vitesse de l'air, il existe deux types de convection, la convection naturelle ou libre quand la vitesse de l'air est inférieure à 0,2m/s et la convection forcée pour des vitesses supérieures à 0,2m/s,
- La température de l'air,
- La température de la peau.

$$C = hc.Fcl(Ta - Tsk)$$

Grandeurs mesurables :

hc : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$). Proportionnel à la vitesse de l'air.

Fcl : Facteur de réduction des échanges de chaleur par les vêtements (chaleur sèche).

Ta : Température de l'air (°C) mesurée à l'aide d'un psychromètre.

Tsk : Température cutanée locale (°C).

Remarque :

Les échanges de chaleur par convection sont proportionnels à la vitesse du fluide en contact. Ainsi plus celle-ci est importante, plus la perte de chaleur par ce mécanisme sera importante. C'est le cas des ventilateurs. Ils ne refroidissent pas l'atmosphère mais contribue à une perte calorifique.

Le rayonnement (**R**)

Le rayonnement représente les échanges de chaleur entre l'organisme et un solide séparé. Les corps chauds émettent de la chaleur vers les corps froids par infra-rouge. (Sidérurgie, travail devant un four fonderie...)

$$C = hr.F_{cl}(Tr - T_{sk})$$

Grandeurs mesurables :

hr : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Tr : Température moyenne de rayonnement de l'environnement ($^{\circ}C$).

L'évaporation (E)

L'évaporation est le moyen le plus efficace pour éliminer la chaleur produite par le corps humain. Il en existe plusieurs formes:

- Perte de vapeur d'eau par les poumons

Négligeable pour l'homme sauf au cours d'exercices musculaires.

- Perspiration :

Diffusion de l'eau des couches superficielles de la peau vers l'extérieur (en générale faible sauf au cours d'exercices musculaires).

- Sudation :

C'est le moyen d'évaporation le plus important à condition que la sueur soit effectivement évaporée c'est-à-dire que l'air ambiant soit renouvelé et non saturé en vapeur d'eau (1 gramme d'eau évaporée permet d'éliminer 0,6 kcal). Elle se fait par la sueur excrétée par les glandes sudoripares.

$$E = he.F_{pcl}.w(P_{sH_2O} - P_{aH_{20}})$$

Grandeurs mesurables

he : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation ($W.m^{-2}.mbar^{-1}$).

F_{pcl} : Coefficient de réduction des échanges de chaleur sensible par le vêtement (chaleur latente).

w : Mouillure cutanée allant de 0,1 (peu mouillé) à 1 (très mouillé, évaporation maximale permise par l'ambiance).

P_{sH₂O} : Pression partielle de vapeur d'eau à la surface de la peau (mbar).

P_{aH₂O} : Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant (mbar).

2.1.4 Le bilan thermique et Evaporation requise (E_{req})

Le bilan thermique correspond à l'ensemble des échanges de chaleur subit par l'organisme :

$$Bilan = M \pm R \pm C - E$$

M représente le métabolisme énergétique général de l'organisme, comprenant le métabolisme de base et le métabolisme d'exercice ($W.m^2$). Le métabolisme d'exercice est fourni par des tables normatives, selon le type d'activité exercé. (cf. Annexe n°2)

Selon diverses conditions, le bilan peut être :

- **Supérieur à 0**

L'organisme est en hyperthermie et emmagasine de la chaleur. Les mécanismes de thermolyse ne sont pas suffisamment efficaces et risquent d'engendrer des pathologies. Il est nécessaire d'agir sur le mécanisme pouvant rendre le plus de résultat.

- **Egal à 0**

C'est la situation la plus favorable. L'opérateur se situe dans une zone de neutralité thermique.

- **Inférieur à 0 : hypothermie**

L'organisme est en hypothermie, il perd plus de chaleur qu'il en gagne ou qu'il en produit. Cette situation engendre elle aussi des pathologies. Il est nécessaire d'effectuer un bilan des contraintes permettant d'établir les causes de ce dérèglement (cause environnementale, vent froid, sur quel mécanisme agir...).

Dans un contexte d'hypothermie ou d'hyperthermie il est possible de déterminer des durées limites de travail de telle façon que le bilan thermique soit nul, c'est à dire en homéothermie.

Dans ce but, nous sommes amenés à déterminer l'évaporation requise qui est l'évaporation nécessaire pour que le bilan thermique soit nul, donc que l'homéothermie soit maintenue au cours de l'activité.

En considérant que le Bilan est nul, nous pouvons écrire :

$$E_{req} = M \pm R \pm C$$

(Cf. Partie 3 : Méthodes d'analyses des ambiances chaudes)

2.2 Lutte physiologique contre les ambiances chaudes et froides

2.2.1 La vasodilatation

C'est le premier mécanisme de lutte mis en œuvre face à une ambiance chaude. C'est un mécanisme surtout efficace au repos puisque l'exercice physique augmente la quantité de sang vers les muscles rendant la vasodilatation difficile.

Elle consiste à favoriser le passage du sang au niveau des couches cutanées grâce à l'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins pour y permettre les échanges de chaleur et donc de refroidir la peau (Perte de calorie par le mécanisme de convection).

La vasodilatation entraîne une diminution de l'apport sanguin dans la sphère digestive ainsi qu'une diminution de la filtration rénale. Le muscle cardiaque et le système nerveux restent des organes fortement irrigués.

2.2.2 La sudation

L'exercice physique limitant la vasodilatation, l'organisme fait intervenir la sudation. C'est le moyen le plus efficace de lutter contre la chaleur. Cependant, une attention toute particulière doit être apportée sur la conception des vêtements de travail car ceux-ci peuvent entraver ce phénomène (la perte de calories par évaporation).

Ce phénomène est limité par la "**sudation maximale**" (S Max) qui est la quantité maximale de sueur qu'un sujet donné peut fournir (à peu près 4 litres pour 8 heures).

La sudation entraîne par ailleurs une perte importante d'eau et de sels divers. La déshydratation de l'organisme doit être limitée à 4 à 6 % du poids du corps. Une perte sudorale maximale admissible (D max) a été fixée. Celle-ci ne doit pas dépasser 1,5 L/h.

Cette sudation est rendue possible grâce aux glandes sudoripares qui vont puiser l'eau et le sel dans le sang. Les glandes vont ensuite de façon pulsative faire remonter l'eau et le sel à la surface de la peau pour que l'eau soit évaporée. Cette eau puise la chaleur de l'organisme pour passer à l'état gazeux et se diluer dans l'air ambiant.

Dès lors la sudation est dépendante de la saturation de l'air en humidité. Si l'atmosphère est fortement humide, le processus de sudation ne sera pas efficace et contribuera au déséquilibre du bilan thermique. Ce phénomène est observé dans les saunas pour lesquels une durée d'exposition a été fixée.

La sudation apparaît toujours après un délai qui dépend de la charge de chaleur et de l'acclimatation du sujet. En cas de forte amplitude thermique ou de début d'un exercice musculaire, le délai est d'environ dix minutes.

2.2.3 L'acclimatation

L'exposition régulière à la chaleur va déclencher une acclimatation du sujet, c'est à dire :

- Déclenchement de la sudation plus rapide,
- Débit sudoral plus important,
- Efficacité thermolytique plus grande.

Ceci a pour conséquence de baisser la température rectale, la fréquence cardiaque et de permettre une meilleure performance pour l'opérateur. L'attention sera portée vers les processus de déshydratation, dangereux pour l'opérateur malgré l'acclimatation.

Les normes prennent en compte l'acclimatation du sujet dans l'évaluation de la contrainte thermique. D'une manière générale, le laps de temps à cette dernière est d'environ 15 jours.

2.2.4 Le frissonnement

Les muscles horripilateurs libèrent, face au froid, de la chaleur en soulevant un poil, ce qui donne une sensation de « chair de poule ».

Ce mécanisme peut s'amplifier jusqu'à provoquer la contraction de gros muscles : c'est le frissonnement. Il a pour objectif le dégagement de chaleur.

2.2.5 La vasoconstriction

Le diamètre des capillaires sanguins, situés sous la peau soumise au froid, va se réduire. Ainsi le volume de sang exposé au froid diminue (l'échange par convection diminue). Parallèlement le sang chaud réchauffe le sang froid en profondeur.

Ce mécanisme est peut efficace car les tissus extérieurs doivent être irrigués pour ne pas entraîner de gelure.

2.2.6 Augmentation du métabolisme de base

Le corps va libérer des hormones qui accélèrent les réactions enzymatiques et ainsi augmenter la production de chaleur générale.

Il faut noter que les mécanismes hormonaux mettent environ une semaine pour lutter et s'adapter efficacement contre le froid. Durant cette phase d'adaptation, l'opérateur nécessite une surveillance particulière.

2.3 Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides

D'une manière générale, les effets dus aux contraintes thermiques chaudes ou froides sont accompagnés d'une diminution des capacités mentales et physiques des opérateurs.

2.3.1 Ambiance chaude :

- Augmentation du rythme des battements du cœur entraînant un risque de syncope,
- Déficit en eau et en sels consécutifs à une transpiration excessive. Ceci entraîne une augmentation de la température du corps ainsi que fatigue, vertiges, nausées,
- Affection cutanée : brûlure, rougeur,
- Coup de chaleur avec perte de connaissance pouvant entraîner la mort (appelé syncope de chaleur).

2.3.2 Ambiance froide :

- Chute de la dextérité articulaire (facteur favorisant l'apparition de TMS),
- Pâleur extrême due à une faible irrigation sanguine de la peau,
- Gelures,
- Baisse de la température (hypothermie) pouvant conduire à une atteinte du système nerveux et des perturbations respiratoires,
- Augmentation de la pression artérielle et des risques d'accident cardiaque (lié à la vasoconstriction).

3 MÉTHODES D'ANALYSES DES AMBIANCES CHAUDES

On distingue deux types de normes :

- Les normes dites de confort thermique (*Norme NF X 35-203 de décembre 1981*)
- Les normes dites de contraintes thermiques (*Norme NF X 35-204 de décembre 1982*)

3.1 Confort thermique et neutralité thermique

3.1.1 Neutralité thermique

Elle correspond à une zone d'ambiance thermique pour laquelle on ne mobilise aucun mécanisme de lutte contre le froid ou le chaud.

3.1.2 Confort thermique

C'est une appréciation subjective. Ainsi, la notion de confort est équivalente pour les trois exemples suivants :

Température	40°C	32°C	28°C
Humidité	26 %	68 %	100 %
Vitesse de l'air	1 mètre par seconde	0,1 mètre par seconde	nulle

Tant que les mécanismes physiologiques de lutte sont suffisants pour assurer un bon équilibre thermique, ce sont des ambiances tolérables. Quand ces mécanismes sont saturés (ex : environnement défavorable), l'équilibre peut être rompu. Il faut alors déterminer des durées maximales d'exposition.

Remarque :

Un bilan thermique nul place le sujet dans une zone de neutralité thermique. Il n'en sera pas totalement satisfait si une partie de son corps est chaude alors qu'une autre partie est froide.

Un tel inconfort thermique local peut avoir plusieurs origines :

- Une trop grande asymétrie de rayonnement qui peut être due à des panneaux chauds, des radiateurs ou inversement à des fenêtres froides, à des murs non isolés...
- Un courant d'air local : on recommande généralement une vitesse d'air inférieure à 0,15 m/s et toujours inférieure à 0,5 m/s. Un léger courant d'air n'est supportable que si la température de l'air est supérieure à la température optimale.
- La température des planchers : on recommande de maintenir les planchers entre 19°C et 26°C.
- Des gradients verticaux de température d'air : entre les chevilles et la tête, on recommande de maintenir une différence de température inférieure à 3°C.

3.1.1 Le PMV (Vote moyen Prévisible)

Le **PMV** est un indice de confort thermique qui permet de prévoir la valeur moyenne des expressions subjectives d'un groupe de personnes exposées à une certaine ambiance thermique et situant leurs sensations sur une échelle de sensation thermique à 7 points :

+3 : Très chaud	+2 : Chaud	+1 : Légèrement chaud
0 : Neutre, ni chaud ni froid		
-1 : Légèrement froid	-2 : Froid	-3 : Très froid

Pour déterminer cet indice on utilise des tables correspondant aux niveaux d'activité (métabolisme **M**) en considérant l'isolement thermique (**Icl**), et la température de l'air (**Ta**) (cf. **Annexe n°3**).

Cet indice n'est utilisable que sous certaines conditions de métabolisme, d'isolement vestimentaire, de température d'air (**Ta**), de rayonnement (**Tr**) et de vitesse d'air (**Va**) :

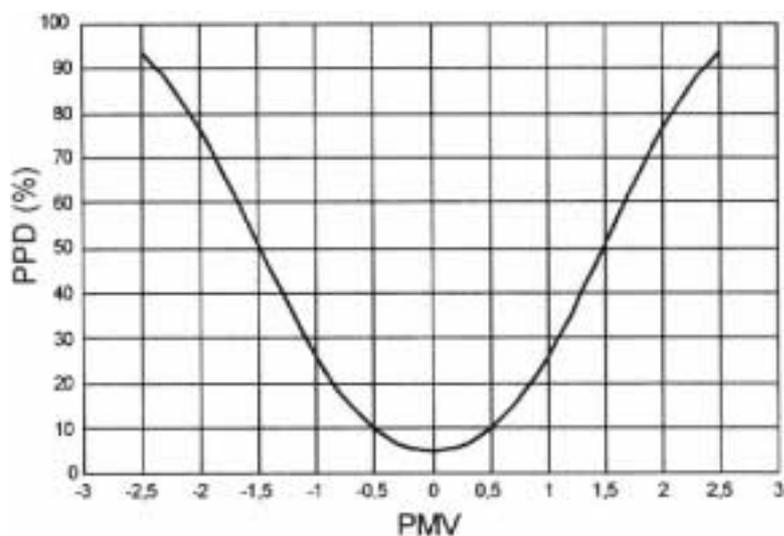
- **M** : 46-232W.M-2
- **Icl** : 0-0.31 m².°C.W-1
- **Ta** : 10-30°C
- **Tr** : 10-40°C
- **Va** : 0-1 m.s-1

On estime que l'ambiance thermique est acceptable, c'est à dire propice au confort thermique, pour la majorité des personnes qui y sont soumise quand cet indice est compris entre +/- **0,5**.

3.1.2 Le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits)

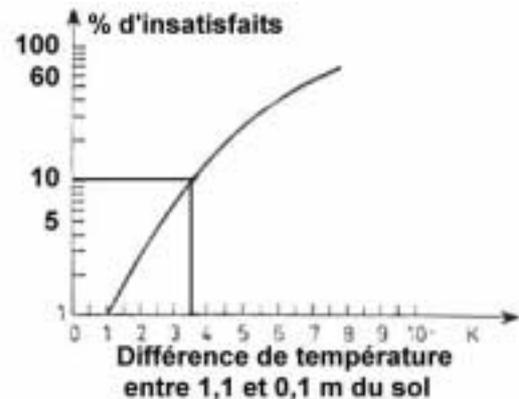
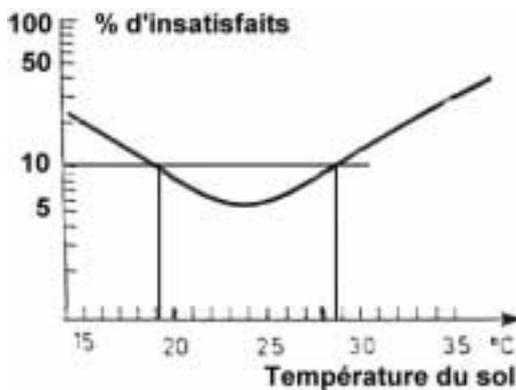
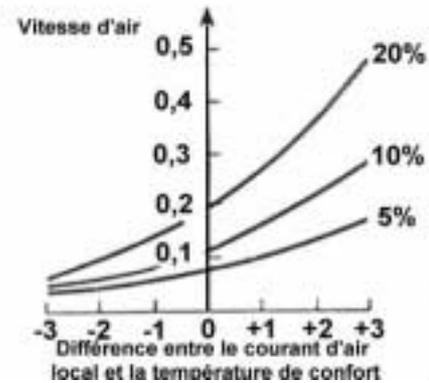
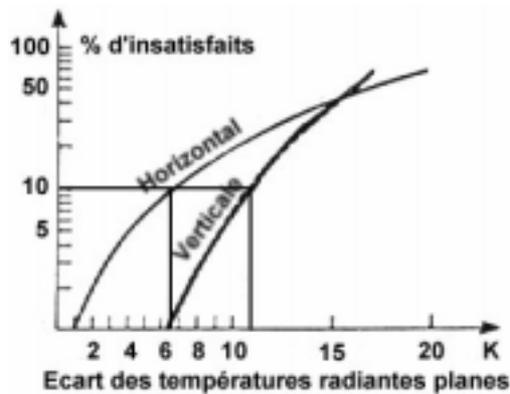
Le **PMV** ne permet pas de déterminer le pourcentage de personnes insatisfaites.

Il était intéressant, dans une population donnée, de calculer le nombre de personnes insatisfaites correspondant au **PMV** de confort. Pour cela on utilise un deuxième indicateur : le **PPD** (Pourcentage Prévisible d'insatisfaits).



Ainsi, pour un PMV de 0,5, on a environ 10% de personnes insatisfaites.

Il est à présent possible de déterminer le pourcentage d'insatisfaits et donc le confort thermique qui résulte pour diverses situations :



3.2 Evaluation de la contrainte thermique

Deux indices permettent d'évaluer la contrainte thermique :

- WBGT : Wet Bulb Globe Temp,
- La sudation requise.

Ces deux indices permettent avec précision d'évaluer le bilan thermique.

Le WBGT est un indice permettant de déterminer si le sujet est capable de travailler dans une ambiance donnée sur une durée de 8 heures. C'est la première démarche à effectuer dans le cas de l'analyse d'un poste de travail soumis à la chaleur.

La sudation requise permet d'établir des limites d'exposition dans le cas où il n'est pas possible de travailler dans l'ambiance considérée durant 8 heures.

3.2.1 Principe et définition du WBGT

Le WBGT est proposé comme une première approche des conditions de travail à la chaleur. C'est un indice qui permet une évaluation simplifiée de la contrainte thermique grâce à une

analogie physique entre les échanges thermiques du corps humain et ceux d'un dispositif de thermomètres humides d'une part et de thermomètres à globe noir d'autre part.

En effet, ce dispositif permet de déterminer la température humide naturelle (**Thn**) et la température de globe noir (**Tg**) de l'atmosphère qui entrent dans le calcul du WBGT :

La mesure de ces températures se fait simultanément à des hauteurs normatives au niveau de la tête, de l'abdomen et des chevilles.

A l'intérieur d'un bâtiment : $WBGT = 0,7Thn + 0,3Tg$

A l'extérieur d'un bâtiment: $WBGT = 0,7Thn + 0,2Tg + 0,1Ta$

Le WBGT globale est donné d'après la formule :

$$WBGT = \frac{WBGT_{tête} + (2 WBGT_{abdomen}) + WBGT_{cheville}}{4}$$

En parallèle, il est nécessaire de procéder à une évaluation du métabolisme de l'opérateur selon son type d'activité (**cf. Annexe n°2**). Des tables normatives fixe ces valeurs par classe.

Ces valeurs repères permettent de savoir si l'opérateur est capable de travailler 8h sans danger dans l'ambiance thermique étudiée. En effet, si le WBGT déterminé est supérieur à la valeur repère de la situation étudiée, cet opérateur ne pourra pas travailler 8h dans cette ambiance thermique (**cf. Annexe n°4**).

Les valeurs repères correspondent à des niveaux d'expositions auxquels la quasi-totalité des personnes peuvent être exposées de manière habituelle sans effets nocifs, sous réserve d'absence d'états pathologiques préexistants.

Elles tiennent compte de l'acclimatation des sujets. Est considérée comme acclimatée une personne en bonne santé qui travaille depuis plus d'une semaine en ambiance chaude au poste considéré.

Malheureusement, cet indice ne donne qu'une idée de l'exposition à une ambiance thermique et n'est pas utilisable pour proposer une démarche de correction. De ce fait, il est nécessaire d'avoir recours à l'indice de sudation requise qui est beaucoup plus précis.

3.2.2 Termes considérés

La température humide naturelle (Thn) en m/s

C'est une température obtenue par un thermomètre recouvert d'une mèche humide ventilée naturellement. Les dimensions et la constitution du « thermomètre humide » à utiliser sont décrites dans la norme ISO 7243. Cette température humide naturelle est d'autant plus basse par rapport à la température de l'air que l'air est moins humide et que la vitesse de l'air est plus grande. C'est à dire que l'évaporation permise par l'ambiance sera d'autant plus importante que la température humide naturelle sera basse.

La température de globe noir (T_g) en °C

Elle correspond à la température relevée au centre d'un globe peint en noir mate dont les caractéristiques sont décrites dans la norme ISO 7243.

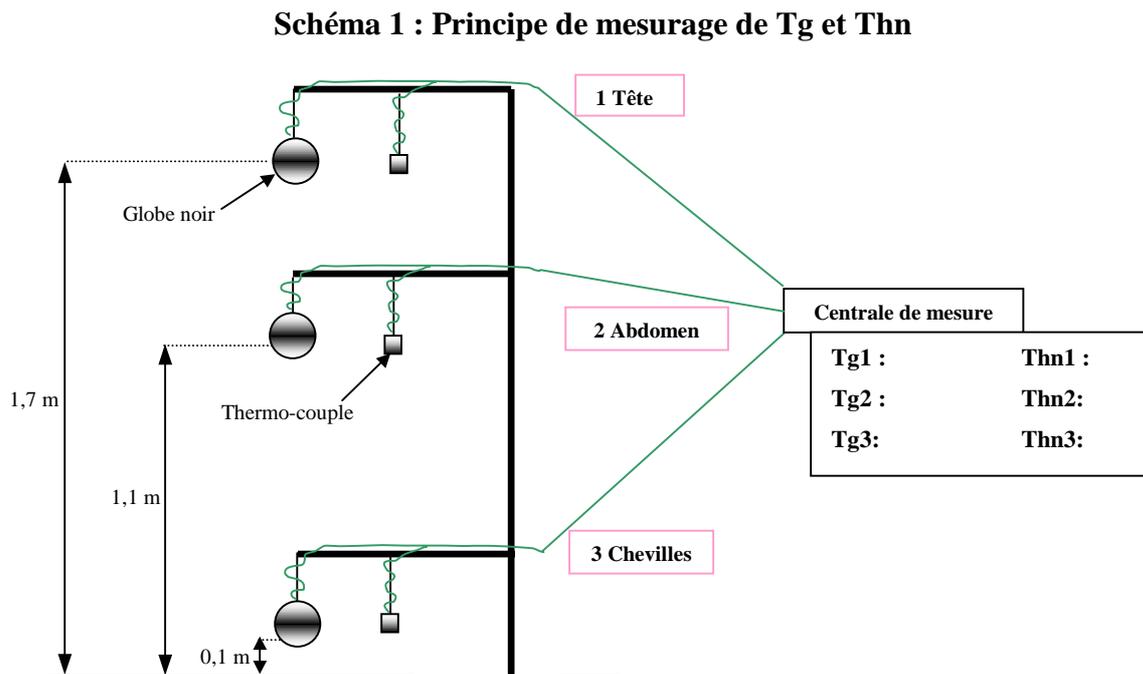
La température de globe noir dépend des échanges thermiques du globe avec l'ambiance par convection et radiation. Elle dépend donc de la température d'air (T_a), de la vitesse de l'air (V_a mesurée par un anémomètre) et de la température de rayonnement (T_r).

En général, l'évaporation requise est d'autant plus grande que cette température de globe noir est plus grande. La température de globe noir permet d'estimer la température perçue au niveau de la peau de l'individu.

La température d'air (T_a) en °C

C'est la température relevée au thermomètre sec, protégé du rayonnement et de l'air environnant. On utilise un psychromètre.

On utilise pour ces différentes températures des thermomètres à thermo-résistance ou à thermocouple.



3.2.3 Exemple :

Un opérateur effectue un transport de matériaux lourds. C'est un nouvel embauché (non acclimaté). Il transporte les matériaux devant un four radian.

Peut-il travailler 8 heures dans ces conditions ?

Les mesures de terrains :

	<u>Thn</u>	<u>Tg</u>
<u>Tête</u>	25°C	50°C
<u>Abdomen</u>	19°C	45°C
<u>Cheville</u>	17°C	20°C

Nous calculons le WBGT pour la tête, abdomen et cheville :

$$\text{WBGT Tête} = 0,7 \times 25 + 0,3 \times 50 = 32,5^\circ\text{C}$$

$$\text{WBGT Abdomen} = 0,7 \times 19 + 0,3 \times 45 = 26,3^\circ\text{C}$$

$$\text{WBGT Cheville} = 0,7 \times 17 + 0,3 \times 20 = 17,5^\circ\text{C}$$

Nous calculons ensuite le WBGT globale :

$$\text{WBGT} = \frac{32,5 + (2 \times 26,3) + 17,3}{4}$$

$$\text{WBGT} = 25,15^\circ\text{C}$$

Selon l'**annexe n°2**, l'activité de l'opérateur est de classe 3, soit un métabolisme élevé. On observe que, d'après l'**annexe n°4**, la valeur repère WBGT, pour un opérateur non acclimaté, est fixée à :

- Absence de courant d'air : 22°C,
- Mouvement de l'air perceptibles : 23°C.

Conclusion :

Que ce soit en absence ou en présence de mouvement d'air, le WBGT globale mesuré auprès du sujet est supérieur aux valeurs repères. Ainsi, l'opérateur ne peut travailler 8 heures dans cette ambiance.

Une étude approfondie est nécessaire. Celle-ci doit permettre d'évaluer une durée limite d'exposition à cette ambiance et, parallèlement, de proposer des axes d'améliorations des conditions de travail.

3.3 Détermination analytique de la contrainte thermique par l'indice de la sudation requise.

3.3.1 Principe et définition de l'indice de sudation requise

L'indice de sudation requise permet une approche plus précise que le WBGT et de caractériser les différents échanges de chaleurs sèches et latentes (convection, rayonnement et évaporation).

On peut ainsi connaître le mécanisme sur lequel il faut agir pour rendre acceptable la contrainte thermique. Cette méthode doit être utilisée en complément de la méthode basée sur l'indice WBGT si celle-ci s'avère négative.

La contrainte thermique en ambiance chaude est évaluée par la mouillure cutanée requise (W_{req}) et l'évaporation requise (E_{req}) du fait des conditions physiques du travail pour maintenir une neutralité thermique.

Ces deux valeurs sont comparées à l'évaporation E_0 constatée sur le terrain (mesurée par pesée du sujet et de ses ingesta) et l'évaporation maximale (E_{max} possible par l'ambiance).

Le but de l'indice est de connaître si l'évaporation constatée sur le terrain est égale à l'évaporation requise théorique pour maintenir l'homéothermie. Si cela n'est pas le cas, il est nécessaire de calculer une durée limite d'exposition (DLE) qui tient compte du stockage maximum de chaleur de l'organisme (H_{max} fournie par des tables normatives) et de la différence entre l'évaporation requise (E_{req}) et l'évaporation mesurée (E_0).

On peut décomposer cette méthode en trois étapes :

- Mesure sur le terrain de l'évaporation réelle de l'opérateur par pesées,
- Calculs basés sur le bilan thermique à partir de valeurs mesurées sur le terrain, notamment T_g , T_a , T_{hv} , V_a ,
- Mesure de la durée limite d'exposition (DLE) si l'ambiance s'avère excessive.

3.3.2 Application

Lors d'une étude de poste, il convient de tenir compte des conditions de travail de l'opérateur et de l'aspect variable des conditions climatiques. On sait que le travail physique est rendu encore plus pénible lorsque ce dernier est exécuté en ambiance chaude.

Les métiers tels que ceux des verriers, des sidérurgistes, qui imposent une activité physique au voisinage de sources de chaleur importantes (fours ou laminoirs), sont réputés pour leur pénibilité.

Afin d'illustrer notre propos, nous vous proposons un compte rendu d'étude d'un poste de confiseur réalisé par l'INRS (cf. [Annexe n°5](#)).

4 MÉTHODES D'ANALYSES DES AMBIANCES FROIDES

L'action du froid doit être considérée :

- D'une part quant à son effet global sur l'ensemble du corps. La contrainte froide est alors estimée par l'isolement vestimentaire requis (Ireq)
- D'autre part quant à son effet local sur une partie du corps peu ou non protégée. La contrainte froide est alors estimée par l'indice de refroidissement WCI (Wind Chill Index)

4.4 Isolement vestimentaire

4.4.1 Principe

La détermination de Ireq procède à une analyse rationnelle des échanges et du bilan thermique de l'organisme :

$$\text{Bilan} = \text{Métabolisme} + \text{C} + \text{R} + \text{E}$$

Les termes ont la même signification que pour le calcul de la sudation requise.

Une méthode de calcul par itération permet de trouver, connaissant les valeurs des paramètres d'ambiance fixant C, R et E ainsi que la production de chaleur métabolique correspondant à l'activité effectuée, quel est l'isolement thermique vestimentaire maintenant le bilan thermique égal à zéro, c'est à dire évitant aussi bien une diminution qu'une augmentation de la température corporelle moyenne.

Une augmentation provoquerait une sudation et donc une humidification des matériaux constitutifs des vêtements, avec réduction de leur isolement thermique.

De ce fait, cette condition équivaut au maintien de la température centrale et la température cutanée moyenne à leurs valeurs normales, respectivement de l'ordre de 37°C et de 33 °C.

4.4.2 L'expression de l'isolement vestimentaire

L'isolement thermique s'exprime par l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du vêtement déterminant une densité de flux calorifique de 1 watt/m².

Les praticiens du vêtement expriment habituellement cet isolement vestimentaire en une unité pratique le clo : 1 clo = 0.155°C/W/m².

4.4.3 Durée limite d'exposition globale

Lorsque l'isolement vestimentaire disponible est inférieur à I_{req} , la durée de l'exposition au froid doit être limitée.

Le bilan thermique négatif ainsi calculé est la quantité de chaleur que la masse corporelle perd par unité de temps. Il lui correspond la vitesse d'abaissement de la température corporelle moyenne.

L'abaissement maximum tolérable de celle-ci est de 1°C . La durée limite d'exposition s'obtient alors en divisant 1°C par la vitesse d'abaissement de la température corporelle moyenne correspondant à la valeur du bilan thermique calculé.

Exemple :

L'abaissement de 1°C de la température corporelle moyenne correspond à un déficit calorifique total de 60 Kcal/h pour un homme de 70 Kg. Si le bilan des flux thermiques est de 30 Kcal/h, la DLE sera de 2 heures. Si le bilan des flux thermiques est de 120 Kcal/h, la DLE sera de 0.5 heures. La température corporelle moyenne s'abaisserait de 0.5°C/h dans le premier cas et de 2°C/h dans le second cas.

4.5 Indice de refroidissement (WCI)

Cet indice est fondé sur l'analogie physique entre la déperdition de la chaleur par convection du corps humain et celle d'un cylindre de matière plastique contenant de l'eau. Au moyen de ce dispositif, une équation empirique a été établie entre le flux de chaleur que le cylindre perd par convection et les paramètres physiques d'ambiance (T_a et Vitesse d'air) dont dépend la convection. C'est le flux de chaleur qui exprime l'indice de refroidissement WCI.

$$\text{WCI (kcal/hm}^2\text{)} = (10.45 - V_a + 10V_a^{1/2}) \times (33 - T_a)$$

L'indice WCI permet de prévoir le délai probable de gelure des zones de peau nue :

WCI (Kcal/hm ²)	Effet
1000	Peau très froide (pas de gelure)
1200	Gelure cutanée après 1 heure
1400	Après 20 min
1600	Après 15 min
1800	Après 10 min
2000	Après 8 min
2200	Après 4 min
2400	Après 1 min

Exemple :

Dans une ambiance où $T_a = -30^{\circ}\text{C}$ et $V_a = 5,0 \text{ m/s}$.

WCI = 2,116 Kcal/h/m², auquel correspond un délai de gelure probable de 6 minutes. L'indice WCI est utilisable en milieu industriel (process avec congélation).

$$\boxed{DLE = 60H \max / E_{req} - E_0}$$

5 RÉDUCTION DE LA CONTRAINTE

Les moyens de réduire la contrainte thermique, et donc d'éviter ses effets sur les opérateurs, sont multiples. Tout en reposant sur des principes simples, ils seront spécifiques à chaque atelier, chaque situation de travail et leur mise en oeuvre nécessitera toujours une étude particulière. Pour cela, le recours à des spécialistes est souvent nécessaire.

5.1 Eliminer les risques

Avant toute intervention de correction d'une situation, il y a lieu de s'interroger sur les possibilités d'élimination du risque :

- En remplaçant les équipements sources de chaleur ou de froid par d'autres moyens faisant appel à des technologies différentes (exemple : le chauffage par induction se substituant au chauffage à la flamme),
- En procédant à de nouveaux agencements des équipements et locaux de travail (exemple : l'éloignement des équipements des zones où s'exerce l'activité des opérateurs).

5.2 Réduire la contrainte thermique dans les ateliers

Pour réduire la contrainte thermique, il est nécessaire d'intervenir sur les différents facteurs de production de chaleur et d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement. Ce qui suppose préalablement une observation et une analyse des postes de travail et de l'activité des opérateurs.

5.2.1 Activité de l'opérateur

L'activité physique de l'opérateur conduit à une production de chaleur par métabolisme. Pour limiter cette production, on peut :

- Automatiser le poste de travail,
- Implanter des aides à la manutention manuelle,
- Limiter les efforts par une étude du poste de travail,
- Fractionner l'exposition à la chaleur en organisant des pauses, des périodes de repos.

L'activité de l'opérateur contribue favorablement à compenser le refroidissement du corps lors de l'exposition en ambiance froide.

C'est cependant un moyen dont il ne faut pas user au-delà des nécessités de la tâche.

5.2.2 Les échanges par rayonnement

Les sources extérieures rayonnent de la chaleur vers le corps lorsqu'elles sont plus chaudes que celui-ci. A l'inverse, c'est le corps qui cède de la chaleur aux sources plus froides que lui. Pour limiter ces échanges on peut :

- Isoler les parties chaudes des machines,
- Encoffrer certaines machines et évacuer l'air chaud par des systèmes de ventilation canalisée,
- Interposer des écrans entre les sources et les opérateurs. Plusieurs types d'écrans sont utilisables (écrans équipés de surfaces réfléchissantes, écrans à circulation d'eau ou d'air interne, écrans à ruissellement d'eau, écrans filtrants),
- Equiper les opérateurs de vêtements spéciaux de protection anti-thermique en ambiance chaude ou de protection contre le froid.

5.2.3 Les échanges par convection

Il est utile de contrôler ces échanges pour leur donner un rôle bénéfique de réduction de la contrainte thermique.

En ambiance chaude, la ventilation par de l'air frais permet de refroidir le sujet ; en ambiance froide, la ventilation par de l'air chaud permet de le réchauffer. Tout procédé contraire à ces principes renforce la contrainte thermique. Pour mettre en œuvre ces moyens on peut :

- Conditionner l'air des locaux par le contrôle de la température et de son humidité,
- Ventiler les locaux (de façon générale, de façon localisée).

5.2.4 Les échanges par évaporation

Pour contrôler l'humidité de l'air on peut :

- Eliminer toute fuite de vapeur,
- Conditionner l'air (comme pour le contrôle de la convection),
- Egalement utiliser des vêtements de protection ventilés et refroidis qui permettent les échanges évaporatoires.

5.3 Promouvoir l'hygiène alimentaire

Il est également intéressant de promouvoir l'hygiène alimentaire. En effet, la consommation de boissons non alcoolisées et le contrôle diététique de l'alimentation participent favorablement à la réduction de la contrainte thermique.

Le médecin du travail joue un rôle essentiel dans ce domaine.

Partie II :

LA CONCEPTION DES LOCAUX

6 RÉGLEMENTATION

Les caractéristiques thermiques des bâtiments et de leurs équipements sont fixées par le décret n°88-355 du 12 avril 1988 (Code de la Construction, art. R. 111-20 à R.111-22), par l'arrêté du 13 avril 1988 pour les bâtiments à usage de bureaux ou de commerce et les bâtiments à usage industriel et par l'arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments (RT 2000).

Les locaux fermés affectés au travail doivent être chauffés pendant la saison froide. La circulaire DRT n°95-07 du 14 avril 1995 a apporté des précisions concernant les locaux fermés.

Les caractéristiques requises en matière d'isolation thermique des bâtiments sont déterminées par le décret n°88-355 du 12 avril 1988 (CC, art. R. 111-20 à R. 111-22) et son arrêté d'application (arrêté du 13 avril 1988).

Les articles R 235-2-9 et R 235-2-10 du code du travail imposent que les équipements et caractéristiques des locaux de travail et locaux annexes doivent permettre d'adapter la température à l'organisme humain pendant le temps de travail compte tenu des méthodes et contraintes physiques supportées par les travailleurs.

6.1 Les normes

- **NF P75-101 :**

Définit les isolants thermiques destinés aux bâtiments.

- **NF P75-102 :**

Fixe le vocabulaire relatifs aux isolants thermiques destinés aux bâtiments, notamment pour l'humidité.

- **NF ISO 6946 :**

Traite des composants et des parois des bâtiments, de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique. Elle énonce ensuite les méthodes de calculs (qui seront traitées plus tard dans notre rapport).

- **NF ISO 12241 :**

Traite de l'isolation thermique des équipements du bâtiment et des installations industrielles (méthode de calcul.)

6.2 L'arrêté du 13 avril 1988 : quand isolation rime avec amélioration des conditions de travail.

Cet arrêté, relatif aux équipements et aux caractéristiques thermiques dans les bâtiments à usage industriel, classe les bâtiments ou parties de bâtiment « chauffés » en deux catégories :

- Sont de catégorie D et dits « à occupation discontinue » les locaux dont la destination est telle qu'on puisse chaque jour cesser de maintenir la température normale d'occupation pendant une période continue d'au moins dix heures, dont cinq heures au moins entre 0 heure et 7 heures.
- Sont de catégorie C et dits « à occupation continue » les autres locaux.

Les locaux visés par le présent arrêté sont généralement de catégorie D.

Le territoire métropolitain est divisé en trois zones climatiques d'hiver H1, H2 et H3. Ces zones ont été établies en fonction de la température moyenne que subit chaque zone afin d'établir une isolation thermique adaptée.

Ainsi, un local à Lille ne subit pas les mêmes températures qu'un local situé à Marseille, les techniques d'isolation seront en conséquence différentes. Le coefficient « Ubât », relatif aux déperditions des locaux s'appuie sur la définition de ces zones.

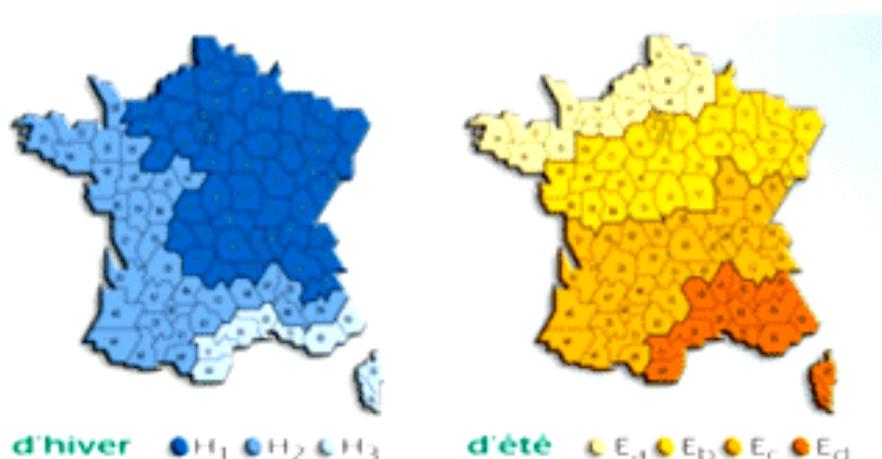


Figure 2 : Cartes des zones climatiques

6.3 La RT 2000 : un aspect à considérer

Entrée en vigueur pour tous les permis de construire déposés à partir du 2 juin 2001, la Réglementation Thermique 2000 (RT 2000) porte à la fois sur les bâtiments neufs résidentiels et tertiaires.

Elle vise à réduire la consommation d'énergie jusqu'à 20 % dans les logements et jusqu'à 40 % dans le tertiaire, conformément aux orientations du programme national de lutte contre le changement climatique. Elle envisage de manière détaillée les consommations de chauffage et l'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage du tertiaire et bientôt la climatisation. Elle vise également à limiter l'inconfort d'été dans les locaux non climatisés.

La diversité des projets de construction et des acteurs impliqués a conduit à prévoir deux méthodes d'application pour permettre à chacun de trouver une approche bien adaptée à ses conditions de travail : des logiciels de calculs et des solutions techniques.

Elle s'exprime sous forme de performances à atteindre pour laisser toute liberté de conception aux architectes et aux bureaux d'études afin de favoriser l'innovation technologique et l'optimisation de leurs projets.

Elle impose trois exigences à satisfaire :

- La consommation d'énergie doit être inférieure à une consommation de référence,
- La température atteinte en été doit être inférieure à une température de référence,
- Des performances minimales sont requises pour une série de composants (isolation, ventilation, système de chauffage ...).

6.2.1 Les enjeux de la réglementation thermique 2000

- Environnemental :

Cette nouvelle réglementation répond à la volonté du Gouvernement de réduire les consommations d'énergie des bâtiments contribuant à la production des gaz à effet de serre, conformément aux accords de Rio et de Kyoto.

- Social :

La maîtrise des coûts et la diminution des loyers ont guidé l'élaboration de la réglementation thermique 2000, pour favoriser la solvabilité des ménages. Les récentes évolutions tarifaires des différentes énergies nécessitent de limiter les consommations par un nouveau renforcement des performances thermiques des logements.

- Economique :

La réglementation thermique 2000 s'appuie sur des méthodes de calculs et des caractéristiques de produits largement définies dans des normes européennes. C'est un plus pour la compétitivité de l'ingénierie, des techniques et produits français sur les marchés à l'exportation.

6.2.2 Les solutions techniques

Les constructeurs pourront se référer à des solutions techniques attachées à des familles de bâtiments définies par leur destination et leurs principes constructifs et architecturaux.

Chaque solution technique indique les combinaisons de produits et d'équipements qui garantissent le respect de la consommation d'énergie de référence et du confort d'été fixée par la réglementation.

Les différents ouvrages et équipements se verront attribuer des points en fonction de leurs caractéristiques thermiques. Le constructeur vérifiera que l'addition des points correspondant aux produits et équipements choisis atteint un montant total autorisé. En deçà, il devra parvenir au résultat en ajustant ses choix par itérations successives.

Industriels, constructeurs ou concepteurs pourront élaborer leurs propres solutions techniques mais elles devront recevoir, au préalable, l'agrément du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement pour que leur application soit conforme à la réglementation thermique 2000.

Comment s'assurer du respect de la RT 2000 ?

- Opter pour des solutions durables, en traitant en priorité l'isolation thermique de l'enveloppe.

- Choisir une résistance thermique R élevée permet de mieux répondre aux exigences.
- Utiliser des produits certifiés Acermi¹ pour une performance thermique garantie et pérenne.
- Limiter les ponts thermiques structurels, notamment ceux liés aux liaisons entre les parois, permet d'améliorer le Ubât ou G1 (déperdition totale du bâtiment).
- Isoler les tuyauteries d'eau chaude sanitaire, de climatisation et les conduits de ventilation.

¹ Certification spécifique aux produits d'isolation.

7 CONCEPTION TECHNIQUE DES LOCAUX

Une fois le cahier des charges défini selon la réglementation en vigueur, il convient de calibrer les moyens d'isolation permettant d'assurer une ambiance thermique correcte et adaptée au type de travail effectué. Cette étape permettra ensuite de dimensionner les moyens de chauffage, en terme de puissance thermique à fournir au bâtiment.

7.1 Quelques repères à prendre en compte :

➤ **Coefficient volumique de déperditions thermiques par transmission à travers les parois : Ubât (anciennement G1)**

« Le coefficient G1 d'un bâtiment ou d'une partie de bâtiment est égal aux déperditions thermiques par les parois de celui-ci ou de celle-ci pour un degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, divisées par le volume intérieur, celui-ci étant compté avec déduction des murs, des planchers, des cloisons, des gaines et des ébrasements de portes et de fenêtres. Le coefficient G1 est exprimé en watt par mètre cube et par degré Celsius. » **Art.5 de l'arrêté du 13 avril 1988.**

Le calcul se fait en additionnant toutes les déperditions par transmission à travers les parois du bâtiment considéré qui sont en contact avec :

- l'extérieur,
- les vides sanitaires,
- le sol,
- et les locaux adjacents.

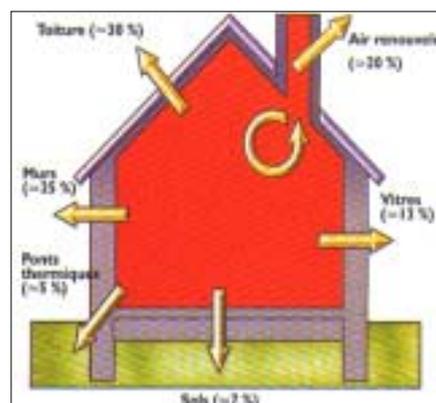


Figure 3 : Déperdition thermique d'un local

Le calcul doit tenir compte de plusieurs facteurs :

- Les caractéristiques thermiques moyennes des matériaux mis en œuvre,
- Les ponts thermiques,
- La protection des vitrages,
- L'exposition au vent,
- La présence éventuelle d'éléments chauffants en paroi.

Pour l'isolation, les déperditions se calculent selon de nouvelles règles Th-U, issu de la RT 2000, qui se substituent aux règles Th-K et Th-G. Les coefficients G1 (tertiaire) et GV (logement) sont remplacés par le Ubât qui se définit comme le coefficient de transmission surfacique moyen de l'enveloppe séparant l'intérieur du bâtiment considéré de l'extérieur, d'un local non chauffé ou du sol.

Le coefficient $U_{bât}$ s'exprime en $W/m^2.K$, et sa valeur se situe entre 0,5 et 1 $W/m^2.K$. Le $U_{bât}$ de référence se calcule suivant la formule énoncée ci-après. Les coefficients, « a1 » à « a10 », sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Ces coefficients sont identiques pour les zones climatiques H1 et H2.

Valeur des coefficients a1 à a10		
	Zones H1 et H2	Zones H3
a1	0,40	0,47
a2	0,23	0,30
a3	0,30	0,30
a4	0,30	0,43
a5	1,50	1,50
a6	2,40	2,60
a7	2,00	2,35
a8	0,50	0,50
a9	0,70*ou 0,90**	0,70*ou 0,90**
a10	0,70*ou 0,90**	0,70*ou 0,90**

(*)Maisons individuelles. (**)Autres Bâtiments.

CALCUL DU COEFFICIENT $U_{bât}$ DE REFERENCE

$$U_{bât\ ref} = \frac{(a1.A1+a2.A2+a3.A3+a4.A4+a5.A5+a6.A6+a7.A7+a8.L8+a9.L9+a10.L10)}{(A1+A2+A3+A4+A5+A6+A7)}$$

A1: Surface des parois verticales opaques

A2: Surface des planchers sous combles

A3: Surface des toitures sous terrasses

A4: Surface des planchers bas

A5: Surface des portes

A6: Surface des fenêtres sans fermeture

A7: Surface des fenêtres avec fermeture

L8: Linéaire du pourtour du plancher bas

L9: Linéaire du pourtour des planches intermédiaires

L10: Linéaire du pourtour des toitures terrasses

➤ Coefficient de transmission thermique d'une paroi

$$\frac{1}{K} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + 0,2$$

Avec :

0,2 : Estimation de la contribution des échanges convectifs

e_i : Epaisseur des matériaux constitutifs de la paroi (en mètre)

λ_i : Coefficient de conductivité de chaque matériaux (en W/m°C)

Quelques exemples :

	e (cm)	λ (W/m°C)
Enduit en plâtre	1,5	0,4
Brique creuse	4,5	0,35
Laine de verre	4	0,035
Brique pleine	22	0,6
Enduit extérieur	2	0,6

Remarque :

Plus λ est petit (ex : laine de verre $\lambda = 0,035$ pour une épaisseur minime de 40 cm), plus l'isolation est importante.

7.2 Matériaux isolants

7.2.1 La laine de verre et la laine de roche

Elles sont issues de procédés de fabrication différents. Elles utilisent toutes deux des matières premières incombustibles et naturelles.

Propriétés

Dans les deux cas, le matelas de laines enchevêtrées emprisonne de l'air, très bon isolant contre le froid et le bruit.



Figure 4 : Laine de verre

Selon les usages, la présentation peut se faire en rouleaux, panneaux, coquilles ou flocons, les propriétés thermo-acoustiques sont excellentes dans les deux cas.

7.2.2 Les isolants en mousse synthétique : Le Polystyrène extrudé



Isolant composé d'une structure à pores fermés, il est produit par le mélange de polystyrène polymère avec un agent moussant volatil.

C'est un bon isolant thermique, parfaitement imperméable.

Figure 5 : Le polystyrène extrudé

7.2.3 Les isolants à base de fibres végétales

Il existe une laine végétale dont la base est constituée par le chanvre. Ce chanvre «industriel» ne doit pas être confondu avec le chanvre indien (Cannabis indica) aux vertus psychotropes et

à l'usage interdit dans notre pays. Le chanvre industriel est quant à lui autorisé et contrôlé par l'Union Européenne.

Aujourd'hui, le chanvre retrouve une application maîtrisée dans l'isolation. Une maîtrise en terme d'isolation thermo-acoustique, mais également en termes d'imputrescibilité ou encore d'effets répulsifs sur les insectes.



Figure 6 : La « laine de chanvre »

Pour arriver à ces objectifs, la fibre de la plante est extraite mécaniquement, et, pour en faire de la «laine de chanvre», on y ajoute, dans une très faible proportion (9 à 15%), un liant synthétique qui assure la stabilité du produit, sa cohésion, sa souplesse et sa résistance dans le temps.

7.2.4 Les isolants couches minces

A la différence des isolants épais classiques (laine de verre, polystyrène...) qui absorbent la chaleur, les isolants minces la renvoient. Une spécificité qui leur permet de réfléchir la chaleur vers l'intérieur en hiver et vers l'extérieur en été, maintenant ainsi une température agréable en toute saison.

Leur minceur les rend parfaitement adaptés à la rénovation et à la réhabilitation quand un problème de place se pose, et permet une mise en œuvre très simple (découpe aux ciseaux ou au cutter, pose par agrafage...)



Figure 7 : Isolant « couche mince »

Un avis du CSTB² sur ces matériaux isolants à couches minces a été publié dans le numéro de mars/avril 2001 du CSTB Magazine :

« Les films dits " réfléchissants " font appel à un principe physique connu depuis longtemps, qui consiste à réduire les échanges thermiques par rayonnement entre deux parois en diminuant l'émissivité de l'une des deux surfaces en vis-à-vis. Or, les performances thermiques, liées aux caractéristiques de surface des films réfléchissants, peuvent se dégrader dans le temps sous l'action de la poussière, des salissures ou de l'humidité. De plus, selon les configurations ou les méthodes de mise en œuvre adoptées, le procédé peut entraîner des ponts thermiques non négligeables et ainsi dégrader les caractéristiques thermiques globales de l'ouvrage. Enfin, les risques en cas d'incendie dépendent de la composition des produits (variable d'un isolant à l'autre), de la paroi et de leur positionnement. »

« La synthèse des résultats de mesures effectuées par plusieurs laboratoires indépendants de Suisse, d'Allemagne, de Grande Bretagne et en France par le CSTB fait apparaître que, même en ne prenant pas en compte la durabilité, les produits minces réfléchissants ne sont pas équivalents à 200 mm de laine de verre de faible densité, ni même à 100 mm et ceci pour les produits réfléchissants associés à deux lames d'air non ventilées. Ces produits à eux seuls sont, dans la plupart des cas, insuffisants vis-à-vis de la réglementation thermique dans les logements. »

² Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

7.3 Solutions existantes pour l'isolation d'un local industriel

Afin de bien comprendre les enjeux d'une isolation thermique d'un local ou d'un bâtiment industriel, voici pour un local exposé au soleil, quelques valeurs d'isolation thermique :

- 1m² de toiture NON ISOLE produit 45 à 85 Kcal/H ;
- 1m² de toiture ISOLE produit 25Kcal/H ;
- 1m² de vitrage NON ISOLE produit 300Kcal/H ;
- Un vitrage ISOLE produit 100 à 200 Kcal/H.

Au vu de ces chiffres, il s'avère que l'isolation d'un atelier permet de diviser par deux la quantité de chaleur (ou de froid) transmise.

Bien sûr, d'autres facteurs interviennent tels que l'aération, la ventilation, le chauffage ou bien la climatisation. Ces différents aspects sont traités par d'autres groupes de travail composés d'étudiants du DESS PRNT.

Le schéma suivant représente un bâtiment industriel dans lequel il est nécessaire de mettre en place une isolation adaptée et efficace à différents niveaux : le toit, les murs, les plafonds, les planchers...

Nous prendrons, pour chaque niveau, un exemple de méthode d'isolation possible.

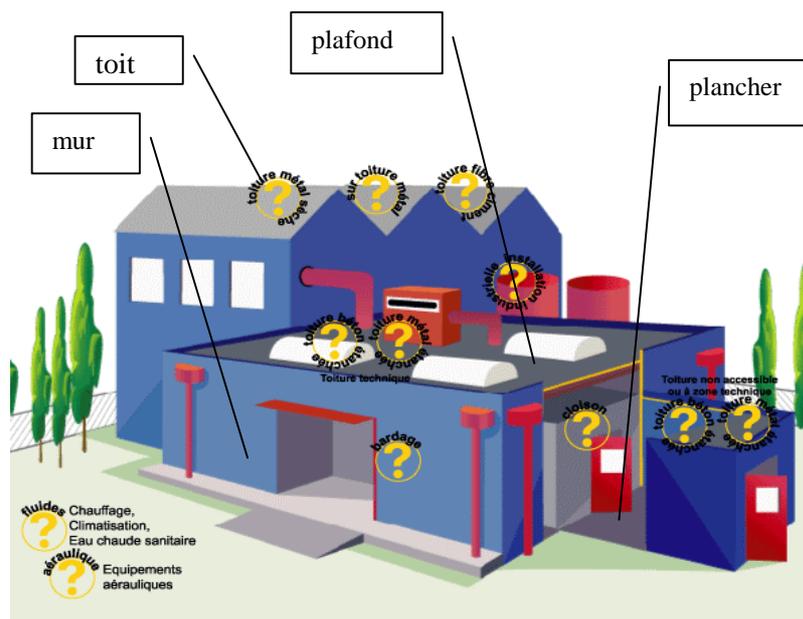


Figure 7 : Bâtiment industriel à isoler

7.3.5 Le toit : pour une toiture métallique sèche

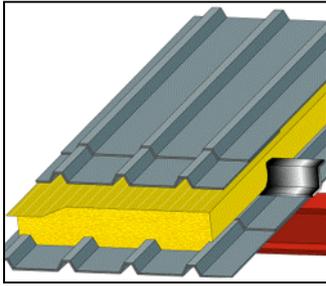


Figure 8 : Toiture double peau à trame parallèle

Dans ce cas, il est possible d'utiliser une « toiture double peau à trame parallèle ». Le système consiste à dérouler un feutre isolant entre deux peaux métalliques séparées par une "fausse panne".

Les avantages de ce procédé sont nombreux :

- Pas de perte de volume dans le bâtiment,
- Pas de fixations apparentes en sous-face de bâtiment,
- Continuité de la couche isolante,
- Ponts thermiques limités,
- Adapté à tous les types d'empannage.

7.3.6 Murs à isolation par l'intérieur

Il s'agit de mettre en oeuvre un isolant sous forme de panneaux ou de panneaux roulés semi-rigides et une contre cloison maçonnée.

La performance thermique de ce procédé (Résistance R) est fonction de l'épaisseur et de la conductivité thermique (λ) de l'isolant choisi. Par exemple $R = 3,15$ avec 100 mm de laine de verre ($\lambda = 0,032$).

C'est une technique qui a l'avantage d'être traditionnelle et qui est donc très bien maîtrisée.



Figure 9 : Isolation d'un mur par l'intérieur

7.3.7 Isolation des plafonds

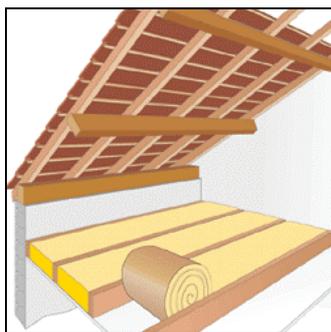


Figure 10 : Isolation du plafond

L'isolation des faux plafonds (plaque de plâtre ou dalle) s'effectue par la pose de rouleaux ou de panneaux de laine de verre dans le plénum.

Cette technique assure, grâce à des produits souples et calfeutrant permettant la continuité de l'isolation, une forte amélioration des performances thermo-acoustiques du plafond traité.

Il est possible de poser jusqu'à 260 mm de laine de verre en une seule couche grâce à une découpe aisée des produits.

7.3.8 Isolation thermo-acoustique des planchers

Il s'agit de mettre en oeuvre un isolant sous forme de panneaux rigides par pose rapportée. L'accrochage des panneaux d'isolant sera réalisée avec des systèmes de vis rondelles et chevilles métalliques spécifiques. Il faut veiller à assurer la continuité de l'isolant en sous face de la dalle.

Cette technique offre une simplicité de mise en oeuvre et est très efficace contre le feu.

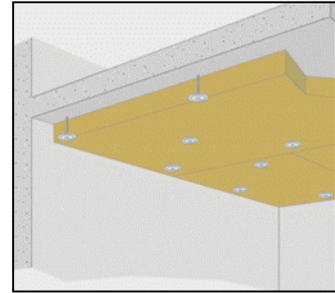


Figure 11 : Isolation du plancher

Bilan :

Ces techniques permettent d'assurer un bon isolement thermique des locaux afin de pouvoir améliorer les conditions de travail des employés, notamment par l'apport d'autres procédés (climatisation, chauffage...).

Cependant, ils existent d'autres techniques. Le maître d'ouvrage (pour une nouvelle installation) ou l'employeur par l'intermédiaire de l'ingénieur sécurité (pour une installation existante) doit choisir la technique en fonction, des objectifs à atteindre en matière d'ambiance thermique et du travail à réaliser dans le local considéré. En effet, il faut savoir qu'il existe des températures optimales suivant le travail effectué :

- pour un travail intellectuel : 18 à 24°C ;
- pour un travail moyen debout : 17 à 22°C ;
- pour un travail dur : 15 à 21°C ;
- pour un travail très dur : 12 à 18°C.

8 DES NOUVELLES TECHNIQUES DITES « ÉCOLOGIQUES »

8.1 L'isolation BIO

8.1.1 Une alternative aux laines minérales et panneaux ?

De plus en plus de maîtres d'ouvrage, sensibles aux problèmes environnementaux (amiante, silices...) refusent les projections ou les soufflages de laines minérales (roche de verre ou laitier).

Il est probable que dans un futur proche les conditions d'utilisation des laines minérales soient durcies voir limitées.

Les panneaux composites ne peuvent être une alternative totale et économiquement intéressante (coût du produit, mise en œuvre, ponts thermiques...).

8.1.2 Fiche technique de la Cellubio Ouate

Cellubio Ouate se présente sous la forme d'une cellulose ignifugée, destinée à l'isolation thermique et à la correction acoustique, applicable à l'aide d'une machine cardeuse, en projection.

Ce sont des matériaux traditionnels composés essentiellement de ouate de cellulose, cardée et aérée, de liants secs inorganiques, d'adjuvants divers et d'agents anti-poussière.

CELLUBIO Ouate	Incombustible : réaction au feu M1 ³
	Pas d'émanation de gaz toxiques ou dangereux en cas d'incendie
	Inattaquable par les rongeurs et les parasites
	Imputrescible, chimiquement inerte et sans réaction avec les supports
	Absorbe les irrégularités des supports sans risque de fissuration

8.2 La démarche HQE⁴

8.2.3 Qu'est-ce que la démarche HQE ?

La démarche "Haute Qualité Environnementale" appliquée à un projet de bâtiment consiste à prendre en compte des critères environnementaux en plus des critères classiques, lors des études préalables, de la programmation, de la conception, de la réalisation, et en vue de l'exploitation et pour certain jusqu'à la fin de vie du bâtiment (démantèlement).

Les objectifs sont de maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur et de créer un environnement intérieur confortable et sain. Cela revêt des aspects techniques, architecturaux et organisationnels : c'est essentiellement une pratique. La plupart des règles sont des règles de bon sens.

³ M1 : matériaux " non inflammables "

⁴ Haute Qualité Environnementale

Outre la satisfaction de donner l'exemple en réduisant les pollutions, les projets de construction écologique HQE permettent de :

- réduire les coûts pour le maître d'ouvrage et pour le gestionnaire (l'employeur),
- garantir la qualité d'usage,
- et valoriser le projet de construction (image).

8.2.4 Les cibles HQE concernant l'isolation thermique

La HQE répertorie 14 cibles environnementales sur lesquelles il est possible d'agir lors de la réalisation d'un projet (cf. **Annexe n°6**).

Parmi ces cibles, quatre concernent directement ou indirectement l'isolation thermique des locaux :

➤ CIBLE 2 : *Choix des procédés et produits de construction*

Les choix des produits de construction (dont font partie les matériaux d'isolation) sont liés principalement aux critères suivants :

- Les investissements en matière première et en énergie dans la production des matériaux et composants et leur transport ;
- Les économies d'énergie et la satisfaction des cibles "confort" ;
- Les contraintes de maintenance ;
- Les possibilités de déconstruction (recyclage) ;
- Les conséquences sur la cible "santé" ;

Le quatrième critère concerne directement les problèmes liés au choix des produits utilisés pour l'isolation des locaux. Il s'apparente au principe de précaution. On connaît aujourd'hui des matériaux ou des composants plus recyclables que d'autres, qu'il convient donc de choisir. Cependant, où en seront les circuits de récupération des matériaux dans 30 ou 40 ans ? Aujourd'hui encore, les cycles de vie des matériaux utilisés dans le bâtiment ne sont pas toujours connus.

Ce critère est devenu très important depuis le scandale de l'amiante.

➤ CIBLE 4 : *Gestion de l'énergie*

Il s'agit ici de renforcer l'isolation de l'enveloppe afin de récupérer la chaleur (par exemple dégagée par les équipements) et ainsi d'économiser l'énergie indispensable pour chauffer les locaux.

Il est intéressant de comprendre qu'une conception réfléchie permet de limiter les coûts de fonctionnement (installation d'une climatisation par exemple). Ces économies sont effectuées essentiellement sur la consommation d'énergie et d'eau.

➤ **CIBLE 8 : Confort hygrothermique**

La conception architecturale est l'élément principal de la cible "Confort".

En améliorant la qualité de vie des usagers des locaux construits, la démarche HQE contribuerait à diminuer le taux d'absentéisme au sein des entreprises ainsi que les accidents et maladies professionnelles.

➤ **CIBLE 12 : Conditions sanitaires**

Ce critère reprend l'ensemble des caractéristiques du bâtiment ayant un rapport direct ou indirect avec l'hygiène et la santé :

- ensoleillement,
- ventilation,
- hygrométrie,
- isolation...

Ces différents paramètres peuvent avoir un impact sanitaire comme l'apparition de moisissures et le développement des acariens.

8.2.5 Quels matériaux isolants choisir lors d'un projet HQE

Outre les critères classiques s'ajoutent aujourd'hui des critères de respect de l'environnement. Ainsi, on pourra citer les nouveaux critères suivants :

- toxicité pour l'environnement ;
- préservation des ressources naturelles sensibles ;
- énergie mobilisée ;
- bilan CO₂ ;
- « recyclabilité ».

Il reste aujourd'hui difficile de faire un choix entre les différents matériaux existant. Les raisons sont le manque d'information sur les produits, leurs procédés de fabrication, leur « recyclabilité » effective. D'autre part, plusieurs critères entrent en jeu, ce qui rend les comparaisons délicates. Le choix final résulte alors d'un compromis.

☹ Aspects négatifs : les isolants minéraux mobilisent de l'énergie et ne sont pas biodégradables. Les isolants dérivés du pétrole génèrent des productions toxiques dans leur cycle de vie.

☺ Aspects positifs : ces isolants sont les plus performants, ils permettent donc de réduire les dépenses d'énergie. Les isolants issus du pétrole comportent du carbone, que l'on préfère voir fixé à l'état solide plutôt que transformé en CO₂ dans les processus de combustion.

Cependant, comme décrit dans les paragraphes précédents, il existe des produits dits « écologiques » tels que le Cellubio Ouate ou le chanvre qui sont à 90% naturels et répondent donc aux exigences de respect de l'environnement souhaitées par la démarche HQE. Celle-ci a permis, grâce à son évolution, une reconnaissance des performances des matériaux isolants naturels.

8.2.6 Les aides financières de l'ADEME

Dans le cadre des aides à la décision, l'ADEME peut financer à concurrence de 50 % l'assistance à maîtrise d'ouvrage, en amont et tout au long du projet, afin d'aider à sa définition et à son suivi. D'éventuels surinvestissements justifiés par la démarche HQE peuvent, en outre, être financés dans le cadre d'opérations exemplaires.

Les délégations régionales de l'ADEME sont les interlocuteurs des maîtres d'ouvrage, en relation avec l'ensemble des acteurs régionaux et nationaux, notamment dans le cadre d'un partenariat avec l'Association HQE.

Conclusion

La prise en compte des besoins des utilisateurs, de la destination des locaux chauffés et des contraintes réglementaires nécessitent une approche pluridisciplinaire.

L'évaluation du risque d'ambiance thermique peut se faire selon plusieurs approches. Le confort thermique est une question d'appréciation relativement subjective et varie selon les conditions environnementales. L'approche basée sur la contrainte thermique et la réponse physiologique de l'organisme est la plus complexe mais la plus exhaustive. Cette dernière permet de mettre en valeur les mécanismes déficients et les réelles causes des déséquilibres.

La réglementation impose à l'employeur une évaluation des risques sans pour autant en préciser la démarche analytique. Celle-ci devra faire preuve de flexibilité et s'adapter à la situation et au besoin.

En complément, la conception de l'installation doit donc être adaptée aux contraintes du poste et au type d'activité. De nouvelles techniques d'isolation ou de construction selon le label HQE constituent une amélioration de la qualité globale des ouvrages.

Bibliographie

LIVRES

Les ambiances thermiques

Institut Universitaire de Médecine du Travail, Rennes, 10 juin 1999.

Stratégie d'évaluation et de prévention / amélioration des risques liés aux ambiances thermiques de travail

Professeur J.Malchaire, Université Catholique de Louvain, 1999

DOCUMENTATION

Documentation INRS : Prévention des risques professionnels « Les ambiances thermiques »

Cours « Ambiance thermique »

B.Metz, Laboratoire de Physiologie appliquée, Faculté de Médecine, Université Louis Pasteur, STRASBOURG.

Cours « Ambiance thermique »

J-P.Libert, Directeur URAPC, Faculté de médecine, Université de Picardie Jules Verne, 2000-2001

@ SITES INTERNET

Site Internet sur le secourisme : [**www.distrimed.com**](http://www.distrimed.com)

Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail : [**www.anact.fr**](http://www.anact.fr)

Site répertoriant toute la législation : [**www.legifrance.fr**](http://www.legifrance.fr)

Institut Nationale de la Recherche Scientifique : [**www.inrs.fr**](http://www.inrs.fr)

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment : [**www.cstb.fr**](http://www.cstb.fr)

Annexes

Annexe 1 : Réglementation – Code du travail

Annexe 2 : Les classes de métabolismes

Annexe 3 : Température opérative maximale (correspondant à $PMV=0$)
en fonction de l'activité et du vêtement.

Annexe 4 : Classes d'activités et WBGT correspondant

Annexe 5 : Charge thermique et physique de travail d'un confiseur

Annexe 6 : Thermes considérés

Annexe 7 : Les 14 cibles HQE

<p>Annexe 1 : RÉGLEMENTATION – CODE DU TRAVAIL</p>

Article L. 230-2 du code du travail

I. - Le chef d'établissement prend les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs de l'établissement, y compris les travailleurs temporaires. Ces mesures comprennent des actions de prévention des risques professionnels, d'information et de formation ainsi que la mise en place d'une organisation et de moyens adaptés. Il veille à l'adaptation de ces mesures pour tenir compte du changement des circonstances et tendre à l'amélioration des situations existantes.

II. - Le chef d'établissement met en oeuvre les mesures prévues au I ci-dessus sur la base des principes généraux de prévention suivants :

- a) Eviter les risques ;
- b) Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités ;
- c) Combattre les risques à la source ;
- d) Adapter le travail à l'homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que le choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et le travail cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé ;
- e) Tenir compte de l'état d'évolution de la technique ;
- f) Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux ;
- g) Planifier la prévention en y intégrant, dans un ensemble cohérent, la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants, notamment en ce qui concerne les risques liés au harcèlement moral, tel qu'il est défini à l'article L. 122-49 ;
- h) Prendre des mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle ;
- i) Donner les instructions appropriées aux travailleurs.

III. - Sans préjudice des autres dispositions du présent code, le chef d'établissement doit, compte tenu de la nature des activités de l'établissement :

- a) Evaluer les risques pour la sécurité et la santé des travailleurs, y compris dans le choix des procédés de fabrication, des équipements de travail, des substances ou préparations chimiques, dans l'aménagement ou le réaménagement des lieux de travail ou des installations et dans la définition des postes de travail ; à la suite de cette évaluation et en tant que de besoin, les actions de prévention ainsi que les méthodes de travail et de production mises en oeuvre par l'employeur doivent garantir un meilleur niveau de protection de la sécurité et de la santé des travailleurs et être intégrées dans l'ensemble des activités de l'établissement et à tous les niveaux de l'encadrement ;

- b) Lorsqu'il confie des tâches à un travailleur, prendre en considération les capacités de l'intéressé à mettre en oeuvre les précautions nécessaires pour la sécurité et la santé ;
- c) Consulter les travailleurs ou leurs représentants sur le projet d'introduction et l'introduction de nouvelles technologies mentionnées à l'article L. 432-2, en ce qui concerne leurs conséquences sur la sécurité et la santé des travailleurs.

IV.- Sans préjudice des autres dispositions du présent code, lorsque dans un même lieu de travail les travailleurs de plusieurs entreprises sont présents, les employeurs doivent coopérer à la mise en oeuvre des dispositions relatives à la sécurité, à l'hygiène et à la santé selon des conditions et des modalités définies par décret en Conseil d'Etat.

En outre, dans les établissements comprenant au moins une installation figurant sur la liste prévue au IV de l'article L. 515-8 du code de l'environnement ou visée à l'article 3-1 du code minier, lorsqu'un salarié ou le chef d'une entreprise extérieure ou un travailleur indépendant est appelé à réaliser une intervention pouvant présenter des risques particuliers en raison de sa nature ou de la proximité de cette installation, le chef d'établissement de l'entreprise utilisatrice et le chef de l'entreprise extérieure définissent conjointement les mesures prévues aux I, II et III. Le chef d'établissement de l'entreprise utilisatrice veille au respect par l'entreprise extérieure des mesures que celle-ci a la responsabilité d'appliquer, compte tenu de la spécificité de l'établissement, préalablement à l'exécution de l'opération, durant son déroulement et à son issue.

Article R. 230-1 du code du travail

« L'employeur transcrit et met à jour dans un document unique les résultats de l'évaluation des risques pour la sécurité et la santé des travailleurs à laquelle il doit procéder en application du paragraphe III (a) de l'article L. 230-2. Cette évaluation comporte un inventaire des risques identifiés dans chaque unité de travail de l'entreprise ou de l'établissement.

« La mise à jour est effectuée au moins chaque année ainsi que lors de toute décision d'aménagement important modifiant les conditions d'hygiène et de sécurité ou les conditions de travail, au sens du septième alinéa de l'article L. 236-2, ou lorsqu'une information supplémentaire concernant l'évaluation d'un risque dans une unité de travail est recueillie. »

Article R. 235-2-9 du code du travail

« Les équipements et caractéristiques des locaux de travail doivent permettre d'adapter la température à l'organisme humain pendant le temps de travail, compte tenu des méthodes de travail et des contraintes physiques supportées par les travailleurs, sans préjudice des dispositions du code de la construction et de l'habitation relatives aux caractéristiques des bâtiments autres que d'habitation. »

Circulaire 14 avril 1995

« La température des locaux de travail doit pouvoir être adaptée à l'organisme humain. La norme NFX 35-203 précise des fourchettes de températures acceptables en fonction du type d'activité des personnes.

Ces conditions de température peuvent être obtenues par des équipements de chauffage, de ventilation, de conditionnement d'air, mais les caractéristiques des locaux doivent être également prises en compte, car l'isolement des parois et filtrage et les protections solaires sont des éléments importants pour les ambiances climatiques des locaux.

Les règles du code de la construction et de l'habitation exigent un isolement minimum des parois des locaux, des lors qu'il est prévu de chauffer ces locaux à plus de 14°C (Article R-111-21).

Annexe 2 :
LES CLASSES DE METABOLISME

Annexe 3 :
TEMPÉRATURE OPÉRATIVE MAXIMALE EN FONCTION DE
L'ACTIVITÉ ET DU VÊTEMENT

Annexe 4 :
CLASSES D'ACTIVITÉS ET WBGT CORRESPONDANT

Annexe 5 :
CHARGE THERMIQUE ET PHYSIQUE DE TRAVAIL D'UN
CONFISEUR

Annexe 6 : THERMES CONSIDERES

Température humide ventilé (Thv) et Température d'air (Ta) °C

Températures indiquées par un psychromètre, le bulbe de l'un des thermomètres (pour Thv) étant recouvert d'une mèche saturée au-dessus de laquelle la circulation de l'air est forcée à environ 4,5m/s afin de parvenir à l'équilibre thermique de l'eau s'évaporant dans l'air, la chaleur de vaporisation étant fournie par la chaleur sensible de l'air.

Vitesse d'air (Va) en m/s

Vitesse réelle instantanée de l'air par rapport au sujet immobile. Déterminée par un anémomètre pouvant être à coupelles (pas conseillé), à fil chaud (conseillé seulement dans des flux laminaires) et surtout à boule chaude (recommandé).

Vitesse d'air relative (Var) en m/s

Vitesse de l'air rapportée à l'organisme humain, y compris ses mouvements corporels.

$$Var = Va + 0,0052 (M - 58)$$

Il convient de plafonner l'augmentation de vitesse de l'air due au travail à **0,7 m/s**.

Pression partielle de vapeur d'eau (PaH₂O) en mbar

Contribution de la vapeur d'eau à la pression atmosphérique. Déterminé par d'une table psychrométrique à partir de la température de l'air et de la température humide ventilée.

Pression partielle de vapeur d'eau de la peau (PsH₂O) en mbar

Pression de la vapeur d'eau saturante à la température cutanée.

Pression partielle de vapeur d'eau de l'air expiré (PexH₂O) en mbar

Pression de la vapeur d'eau contenue dans l'air expiré. Ce paramètre est estimé à 59 mbar.

Humidité relative (Hr) en %

C'est le pourcentage de la pression partielle de vapeur d'eau PaH₂O par rapport à la pression de vapeur à la saturation à la même température.

Métabolisme (M) en W/m²

Transformation de l'énergie chimique en énergie thermique et mécanique, par le jeu de réactions aérobies et anaérobies se déroulant dans l'organisme entier. Le flux total d'énergie ainsi produit est habituellement rapporté à l'unité de surface compte tenu de la surface corporelle totale. Ce paramètre est évalué par certaine table de classification des niveaux métabolisme.

Isolement thermique intrinsèque d'un vêtement (Icli) en clos ou m².°C/W

Isolement thermique assuré par la pièce vestimentaire elle-même. Déterminé grâce à des tables. On utilise la somme des I_{cli} correspondante à la tenue vestimentaire du sujet considéré.

Isolement thermique total vestimentaire (I_{cl}) en clos ou $m^2 \cdot ^\circ C/W$

Isolement thermique propre du vêtement, c'est à dire la résistance exercée par une couche d'isolement uniforme recouvrant la totalité du corps ayant le même effet sur le flux de chaleur sensible que l'ensemble vestimentaire réel dans des conditions (immobilité du corps et de l'air) normalisées. La définition de l'isolement thermique d'un ensemble vestimentaire tient également compte des parties non recouvertes du corps, comme la tête et les mains.

Pour une femme :

$$I_{cl}(en.clos) = 0,770 \sum I_{cli} + 0,005$$

$$I_{cl}(en.m^2 \cdot ^\circ C/W) = 0,770 \sum I_{cli} + 0,008$$

Pour un homme

$$I_{cl}(en.clos) = 0,727 \sum I_{cli} + 0,113$$

$$I_{cl}(en.m^2 \cdot ^\circ C/W) = 0,727 \sum I_{cli} + 0,018$$

Température moyenne de rayonnement (T_r) en $^\circ C$

Température uniforme d'une enceinte noire théorique dans laquelle l'occupant échangerait la même quantité de chaleur rayonnante que dans l'enceinte réelle non uniforme.

En convection naturelle ($V_a < 0,2m/s$)

$$T_r = \left[(T_{g_r} + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 (T_g - T_a)^{1/4} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273$$

$$T_r = \left[(42 + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \times V_a^{0,6} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273$$

En convection forcée ($V_a > 0,2m/s$)

Température cutanée moyenne (T_{sk}) en $^\circ C$

Somme des produits de l'aire de chaque élément de surface élémentaire et de sa température, divisée par l'aire totale du corps.

$$T_{sk} = 30 + 0,093T_a + 0,045T_r - 0,571V_a + 0,0254PaH_2O + 0,00128M - 3,57I_{cl}$$

Température d'air expiré (T_{ex}) en $^\circ C$

Température moyenne de l'air expiré estimée à $36^\circ C$.

Coefficient de transfère de chaleur par rayonnement (H_r) en $W/m^2/^\circ C$

Débit de chaleur par unité de surface, provoqué par le rayonnement mutuel entre deux surfaces, divisé par la différence de leurs températures.

$$h_r = \frac{\sigma \mathcal{E}_{sk} A_r}{A_{Du}} \frac{\left[(T_{sk} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right]}{(T_{sk} - T_r)}$$

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)

\mathcal{E}_{sk} : émissivité cutanée c'est à dire absorption de l'infrarouge de la peau (0,97)

$\frac{A_r}{A_{Du}}$: fraction de surface cutanée participant aux échanges de chaleur par rayonnement.
 Accroupi 0,67 ; assis 0,70 ; debout 0,77

Coefficient de transfère de chaleur par convection (Hc) en W/m²/°C

Débit de chaleur échangé par unité de surface entre une surface et un fluide mobile, divisé par la différence de température échangée par la surface et le fluide.

En convection naturelle (Va < 0,2m/s) : $hc = 2,38 (T_{sk} - T_a)^{0,25}$

Si Var < 1 m/s : $hc = 3,5 + 5,2 Var$

Si Var > 1 m/s : $hc = 8,7 Var^{0,6}$

Coefficient de transfère de chaleur par évaporation (He) en W/m²/mbar

Quotient du débit surfacique de chaleur latente par le gradient de pression de vapeur d'eau entre surface humide et air humide, qu'il y ait évaporation ou condensation d'eau liquide à la limite de cette surface.

Facteur de surface du vêtement (fcl)

Rapport de la surface du corps vêtu, y compris les parties non vêtues, à la surface du corps nu.

$$fcl = 1 + 1,97 Icl$$

Facteur de réduction des échanges de chaleur par le vêtement (Fcl)

Rapport de la perte réelle de chaleur sensible à celle d'un corps nu dans les même conditions, moyennant un ajustement lié à l'augmentation de la surface d'échange due au vêtement.

$$Fcl = 1 / [(hc + hr)Icl + 1 / fcl]$$

Facteur de réduction des échanges de chaleur sensible par le vêtement (Fpcl)

Rapport de la perte réelle de chaleur par évaporation à celle d'un corps nu dans les même conditions, moyennant un ajustement lié à l'augmentation de la surface d'échange due au vêtement.

$$Fpcl = 1 / [1 + 2,22hc(Icl - (1 - 1/fcl)) / (hr + hc)]$$

Débit de chaleur par convection (C) :

Débit de chaleur par rayonnement (R) :

Débit de chaleur par convection (C) :

} Cf. : 2.1.3

Débit évaporatoire maximal au niveau de la peau (Emax) en W/m²

Débit maximum de chaleur latente dans le cas hypothétique d'une surface cutanée intégralement mouillée.

$$E \text{ max} = he.Fpcl(PsH_2O - PaH_2O)$$

Débit de chaleur par convection respiratoire (C_{res}) en W/m^2

Echange de chaleur par convection dans les voies respiratoires.

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M (T_{ex} - T_a)$$

Débit de chaleur par évaporation respiratoire (E_{res}) en W/m^2

Perte ou gain de chaleur latente par l'évaporation en condensation dans les voies respiratoires.

$$E_{res} = 0,00173M (P_{exH_2O} - P_aH_2O)$$

Débit de chaleur par évaporation requise (E_{req}) en W/m^2

Débit évaporatoire nécessaire au maintien de l'équilibre thermique du corps.

$$E_{req} = M \pm C_{res} - E_{res} \pm C \pm R$$

Mouillure cutanée requise (W_{req})²

Rapport du débit d'évaporation requise au débit évaporatoire maximal possible.

$$W_{req} = E_{req} / E_{max}$$