

# Cours Technologie (de l'hygiène) du travail

Prof. J. Malchaire

## Ambiances thermiques

### A. Introduction

#### 1. Directive 89/654: Prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les lieux de travail

- La température dans les locaux de travail doit être **adéquate** pour l'organisme humain compte tenu des activités, des contraintes physiques et de la destination spécifique du local
- pas d'ensoleillement excessif

#### 2. Bilan thermique

Production interne de chaleur = pertes de chaleur

$$M - W = C_{res} + E_{res} + C + R + K + E$$

- M métabolisme de travail
- W travail extérieur fourni
- C<sub>res</sub> convection respiratoire = f(t<sub>a</sub>, M)
- E<sub>res</sub> évaporation respiratoire = f(Hum, M)
- C convection = f(t<sub>a</sub>, V<sub>a</sub>, clo)
- R rayonnement = f(t<sub>r</sub>, clo)
- K conduction = f(t<sub>a</sub>, surfaces, ...)
- E évaporation = f(SW, hum, V<sub>a</sub>, clo)

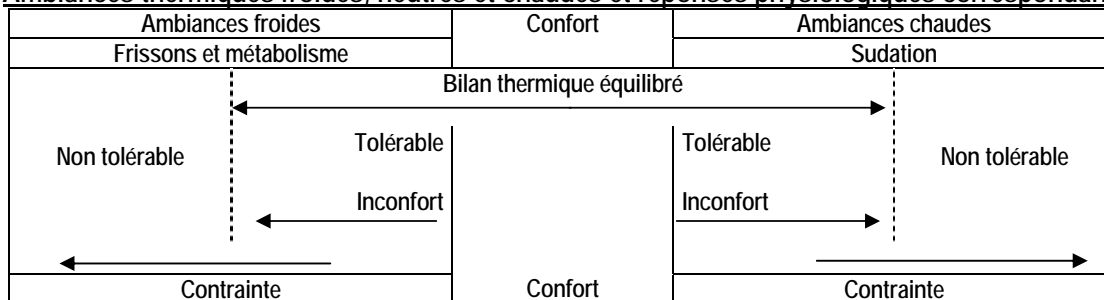
6 paramètres

- climat t<sub>a</sub>, t<sub>r</sub>, V<sub>a</sub>, Hum
- travail M, clo

#### 3. Thermorégulation

- Confort: bilan équilibré pour t<sub>sk</sub> et E optimales
- Si climat plus chaud
  - vasodilatation: sang à la peau
  - sudation: risque de déshydratation mais bilan équilibré: ajustements comportementaux (clo, ...)
  - bilan déséquilibré et stockage: hyperthermie, syncopes, crampes, coups de chaleur
- Si climat plus froid
  - vasoconstriction: peau isolante, bilan équilibré: ajustements comportementaux
  - FRISSON
  - Refroidissement hypothermie

#### 4. Ambiances thermiques froides, neutres et chaudes et réponses physiologiques correspondantes.



## 5. Effets liés au travail au froid et au chaud

## 6. C E N : Transposition des normes ISO

- Données de base
  - ISO 7726 Instruments et méthodes de mesure des grandeurs physiques
  - ISO 8996 Métabolisme de travail
  - ISO 9920 Caractéristiques thermiques du vêtement
- Evaluation du risque
  - FROID : ISO Détermination de l'isolement thermique vestimentaire requis
  - CONFORT: ISO 7730 Indices PMV-PPD
  - CHAUD:
    - A. méthode d'approche : ISO 7243; WBGT
    - B. méthode d'analyse : ISO 7933: PHS Contrainte thermique prédite.
- EVALUATION DIRECTE PAR LE TRAVAILLEUR
  - ISO 7886 Évaluation de la contrainte thermique par mesures physiologiques
  - ISO 10551 Évaluation du confort thermique subjectif au moyen d'échelles de jugement

## 7. Vêtements

### • Isolement contre la chaleur

- L'isolement thermique du vêtement se définit en Clo. Les ordres de grandeur sont:

Tenue de tennis	0,5 Clo
Chemise courte sans cravate, pantalon léger	0,6 Clo
Salopette de travail	0,7 Clo
Chemise longue, cravate	0,8 Clo
Tenue d'hiver, sans veston	0,9 Clo
Complet veston, cravate	1,0 Clo
+ Pardessus, veste d'hiver	1,3 Clo

### • Isolement contre le rayonnement

- La protection contre le rayonnement s'obtient au moyen de matériaux aluminisés (réflexion : 60 à 95%)
- Cette réduction est limitée aux surfaces couvertes, soit à :
- Le vêtement aluminisé peut nuire à l'évaporation de la sueur de sorte que l'avantage point de vue rayonnement soit réduit, annulé et parfois aggravé par une réduction de l'évaporation.
- L'efficacité du vêtement aluminisé est très rapidement réduite par la salissure, le vieillissement, ...

### • Isolement contre l'évaporation

- Les vêtements doivent être perméables à la vapeur d'eau sous peine de créer un microclimat qui pourrait poser plus de problèmes que le climat extérieur.
- Les vêtements humides doivent être séchés au plus vite.

## B. Mesures climatiques

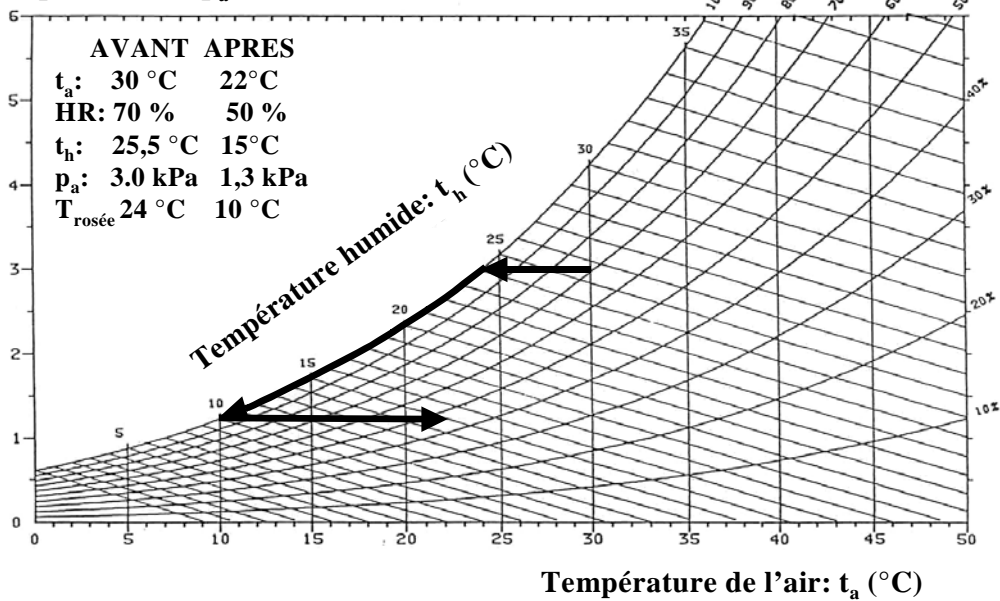
### 1. ta: température de l'air protection contre le rayonnement

### 2. Humidité

- humidité absolue x g/kg air sec
- pression partielle de vapeur d'eau Pa mmHg kPa
- température de rosée  $t_{dew}$
- humidité relative  $HR\% = Pa / Ps,ta$

**Pression partielle  
de vapeur d'eau:  $p_a$  (kPa)**

**Humidité relative: HR (%)**



- Psychromètre



- thermohygrographe

### 3. Rayonnement

- $t_r$ : température moyenne de rayonnement  
Température fictive d'une sphère de grand diamètre noire-mate (émissivité = 1) centrée sur le sujet qui échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement hétérogène considéré
- $t_g$ : température du globe noir  
noir mat de 15 cm diamètre, influencée par  $t_a$ , R,  $V_a$   
Expression mathématique pour passer de  $t_g$  à  $t_r$  en fonction de ( $t_a$ ,  $V_a$ , diamètre, émissivité)



### 4. Vitesse de l'air

- anémomètre à ailettes 0,3 ..... 8 .... 20 m/s
- anémomètre à fil chaud 0 .....5 m/s



## C. Confort thermique

### 5. Définition

Combinaison de  $t_a$ , HR%, R,  $V_a$ , M, clo telle que  $t_{sk}$  optimale et E optimale

- Par équation du bilan thermique: →  $t_a$  optimale en fonction des autres paramètres
- Si  $t_a$  différente

Détermination du **vote moyen prédit** (Predicted Mean Vote **PMV**), sensation moyenne sur échelle

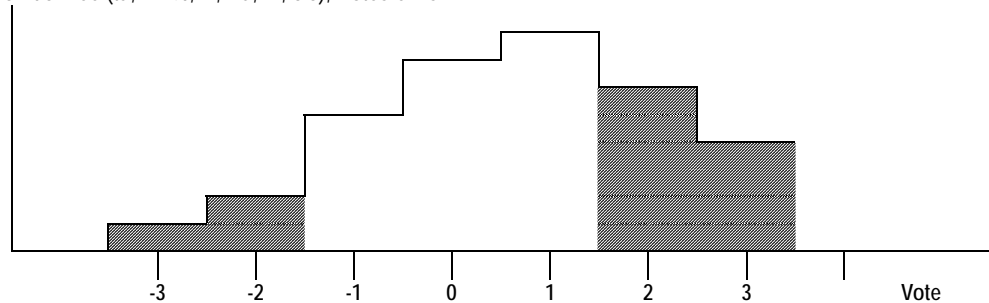
<b>Sensation</b>	très froid	froid	légèrement	neutre	légèrement	chaud	très chaud
------------------	------------	-------	------------	--------	------------	-------	------------

			froid		chaud		
PMV	-3	-2	-1	0	1	2	3

- par programme informatique
- par tables

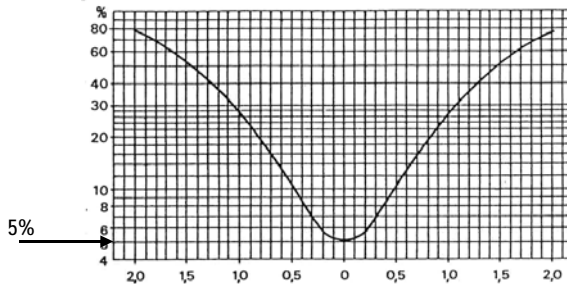
## 6. Variabilité

Dans une situation donnée ( $t_a$ , HR%, R,  $V_a$ , M, clo), Votes émis  
fréquence



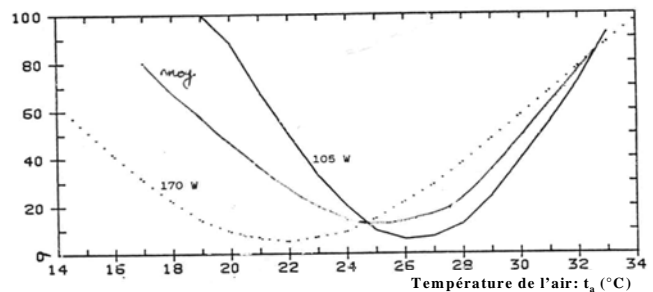
Votes en dehors [-1, 0, +1] réputés insatisfaits  $\Rightarrow$  Pourcentage prédit d'insatisfaits PPD

PPD: % prédit d'insatisfaits



PMV: Vote moyen prédit

PPD %



## 7. Valeurs limites

Dégradation plus importante des performances (durée, incidents, accidents) pour climat plus chaud que plus froid  
D'où spécification d'une gamme de  $t_a$  telle que [-20%, 10%] PPD

## 8. Exemples

- Bureau atelier conditionnement, femmes assises, travail léger des mains: 170 W, tablier sur chemisier + sous-vêtements: 0,75 clo, pas de rayonnement ( $t_r = t_g = t_a$ ), vitesse optimale de 0,15 m/s, humidité relative de 40%  
 $\Rightarrow$  pour P.M.V. = 0 et P.P.D. = 5%,  $t_a = 21^\circ$ , Gamme acceptable [18 – 23,5°]
- Bureau en été où  $t_a = 27^\circ$ ,  $V_a = 0,10$  m/s,  $t_g = 29^\circ$ , HR = 30%, personnel travail sédentaire (125 W) et tenue été, chemise légère (0,5 clo)  
 $\Rightarrow$  P.M.V. = 1,3: légèrement chaud et P.P.D. = 35%: insatisfaits  
 $t_a$  optimale = 25°C avec  $t_g = t_a$

### • Intérêt

- détermination du point de consigne optimal en intégrant tous les facteurs
- appréciation objective des plaintes

## 9. Limites des paramètres individuels

### • Humidité:

40%.....  
Assèchement voies respiratoires  
Odeurs (tabac, corps)  
Poussières, électricité statique  
Maladies respiratoires  
! humidificateurs (L. pneumophilla)

..... 70% (8 g/kg air sec)  
pollution  
 $\uparrow$  microbes  
 $\uparrow$  condensation

### • Vitesse:

Assis < 0,25 m/s en moyenne 0,5 m/s pointes  
Debout < 0,5 m/s en moyenne 1 m/s pointes

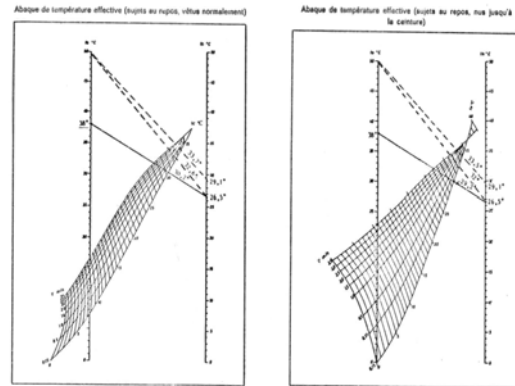
- **Variations:**  
 Après repas  $M \nearrow$  top  $\leftarrow 0,3 \dots 1^\circ\text{C}$   
 1ère à 3ème heure  $t_a \nearrow 1$  à  $1,5^\circ\text{C}$   
 Différence intérieur-extérieur en été:  $\leq 6^\circ\text{C}$   
 Différence  $\Delta t$  plafonds  $16^\circ$ , radiateurs  $30^\circ$ , vitres  $-20^\circ$   
 $\Delta (t_r - t_a) \leq 3^\circ\text{C}$

## D. Contrainte thermique

### 10. Les indices

Intégration de ( $t_a$ , HR%, R,  $V_a$ , M, clo) dans indices d'échelle de sévérité ou de prédiction du risque

- **Indices analytiques**  
 Mesures individuelles des facteurs climatiques  
 A. empiriques: TEF, P4SR  
 B. bilan thermique: HSI, ITS,  $SW_{req}$ , PHS
- **Indices intégrateurs empiriques**  
 Mesurage global des facteurs climatiques  
 WBGT



### 11. Indices basés sur bilan thermique

$$M - W = C_{res} + E_{res} + C + R + E$$

- **Prédiction de**
  - La chaleur accumulée au temps t du fait de la sudation insuffisante
  - La perte hydrique au temps t
  - La température centrale au temps t
- **Pour des sujets acclimatés** transpirent plus, plus tôt, plus uniformément  
**NON acclimatés**
- **Protection**
  - Moyenne : sujet moyen
  - 95% : sujet très sensible
- **Critères**
  - perte hydrique maximale sur 8 heures  
 7,5% poids pour sujet moyen  
 5% poids pour protéger 95%
  - température centrale (rectale) maximale  $38^\circ\text{C}$   
 pour que probabilité de  $39,2^\circ\text{C}$  =  $1/10\ 000$  =  $10^{-4}$   
 probabilité de  $42^\circ\text{C}$  =  $1/10\ 000\ 000$  =  $10^{-7}$   
 $39,2^\circ\text{C}$  risque de modifications physiologiques réversibles importantes (coup de chaleur)  
 $42^\circ\text{C}$  séquelles physiologiques
- **Critique**
  - Modélisation critiquable (clo, ...), mais améliorable
  - (?) difficile à assimiler et à utiliser
  - Mais : modèle le plus élaboré et le plus puissant pour l'organisation du travail (DLE périodes de repos) et la recherche des améliorations

### 12. WBGT

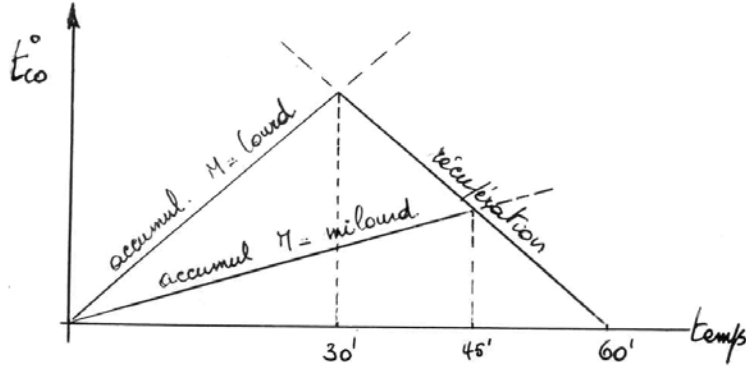
$$\begin{aligned} \text{WBGT} &= 0,7 t_{hm} + 0,3 t_g && \text{sans R solaire} \\ &= 0,7 t_{hn} + 0,2 t_g + 0,1 t_a && \text{avec R solaire} \end{aligned}$$

- **Exemples:**

$t_a$	$t_g$	$t_h$	$V_a$	WBGT
30	30	18	0,15	22,3
35	35	20	0,15	25,2
35	51	23	0,10	34,9

- **Limites**

M	Acclimaté	NON acclimaté
< 118W	33	32
118-234 lg	30	29
235-360 mild	28	26
361-468 ld	25 - 26	22 - 23



>468	23 - 25	18 - 20
air calme	courant d'air	air calme

Valeur de l'indice WBGT			Alternance du travail	
travail léger 170 watts	travail mi-lourd 290 watts	travail lourd 400 watts	Temps de travail (min)	temps de repos (min)
30,1	26,8	25,1	110	10
30,4	27,5	25,5	100	20
30,6	28,0	25,9	45	15
30,9	28,5	26,6	40	20
31,2	29,0	27,3	35	25
31,5	29,5	28,0	30	30
31,8	29,8	28,7	25	35
32,1	31,1	29,4	20	40
32,4	31,4	30,1	15	45
32,7	31,7	30,8	10	50
33,0	32,0	31,5	5	55

### REPOS ASSIS SUR le lieu de travail

- **CRITIQUE**
  - Représentativité et reproductibilité (validité) des mesurages de  $t_{m}$  et  $t_g$
  - Repos prévu assis SUR le lieu de travail
  - Limitation
    - Non pas pour élévation 1°C température centrale, mais récupération dans l'heure
    - Camouflage des données primaires
    - Pas de possibilité de recherche des solutions optimales

## E. Prévention

### 1. BOISSONS

- **Contrainte par le froid:**
  - boissons chaudes.
- **Contrainte par le chaud:**
  - eau ou boisson non gazeuse et non sucrée à 10-15°C.
- **Eviter dans les deux cas :**
  - boissons gazeuses : sinon troubles gastriques;
  - boissons sucrées : sinon obésité;
  - café, thé fort : nervosité;
  - boissons alcoolisées;
  - eau trop froide : troubles gastriques;
  - grandes quantités en une fois : troubles gastriques;
  - eau salée ou tablettes de sel : la perte en sel est acceptable, sauf dans des conditions extrêmes répétées, et il n'y a pas lieu de donner un apport de sel.
  - Installer des fontaines d'eau refroidie à 10-15°C près des postes de travail.

### 2. Améliorations techniques

- **Rayonnement**
  - 1°  $\epsilon$  t surf isolation thermique
  - 2°  $\epsilon$  couleur lisse brillante
  - 3° écran opaque - treillis/vitre
- **Vitesse**
  - < 1 m/s position debout, travail lourd;
  - exposition continue

- < 3 m/s exposition intermittente
- < 10 m/s exposition courte
- **Température et humidité**
  - Réduction des apports externes
    - parois opaques, toits : isolation thermique, réflexion, refroidissement
    - fenêtres : orientation, réflexion, verres spéciaux, absorption IR
  - Réduction apports internes
    - isolation thermique conduites ...
    - aspiration locale (t°, humidité)
    - ventilation générale
- **Vêtements légers, adaptés et confortables**
- **Charge de travail**

### 3. Adaptation de l'ORGANISATION DU TRAVAIL

- **Programmation des opérations**
  - Heures les plus fraîches
  - Périodes de l'année les plus froides
  - Identification des travaux
  - Ajustement des horaires
- **Optimisation cycle travail-repos**
  - Organisé (prédiction PHS)
  - Spontané (après formation)
  - PAS de primes
- **Amélioration de la tolérance physiologique**
  - Acclimatement
  - Rehydratation
- **Formation et encadrement des travailleurs**

### 4. Evaluation astreinte thermique

- **Température centrale**

Chair		Sang
rectale		œsophage
urine		bouche
		tympan
	intra abdominale	
	conduit auditif	

- **FC** 4ème minute de récupération
- **Perte de poids**
- **Température de peau**

### 5. Limites astreinte thermique

- **t<sub>co</sub>**
  - si accum. lente :  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ ,  $38^\circ$ , si mesure intermittente, t<sub>ty</sub> ou t<sub>cond aud</sub>, pas personnel médical, pas autre paramètre
  - si accum. rapide : idem si mesurage de t<sub>re</sub>
  - Si mesurage de t<sub>oe</sub>, FC :  $\Delta t = 1,4^\circ\text{C}$ ,  $38,5^\circ\text{C}$ ,  
 >  $38,5^\circ\text{C}$  si sélection médicale et sujets acclimatés  
 <  $39^\circ$  si t<sub>oe</sub>, FC continu
- **T<sub>sk</sub>** : seuil de douleur =  $45^\circ\text{C}$ ,  $4^\circ$  (extrém.),  $17^\circ$  (front)
- **FC** : absolu 185 – 0,65 âge  
relatif  $\Delta\text{FC}_{th} = 30 \dots 60$  bpm
- 4.  $\Delta m = 800\text{g}$  si NON accl., càd perte hyd. de 3250 g à 75% compensée  
1300g si Acclimaté, càd 5200 g