

# LE TRAVAIL A LA CHALEUR

Professeur J. Malchaire

- septembre 2003 -

## PLAN

*I. BILAN THERMIQUE  
THERMOREGULATION*

*II. MESURAGE DES PARAMETRES PRIMAIRES*

*III. CONFORT*

*IV. CONTRAINTE THERMIQUE*

*A. Définition "Predicted Heat Strain - PHS"  
"WBGT"*

*B. Prévention - améliorations*

*V. SURVEILLANCE MEDICALE*

*VI. STRATEGIE DE PREVENTION*

## IMPORTANCE DU PROBLEME

Plaintes pour conditions thermiques de travail.

Rayonnement sidérurgie

métaux non ferreux  
verreries  
bâtiment  
fours

Humidité

mines  
papeteries  
céramique  
alimentaire

Inconfort

bureaux  
industrie en général

## DIRECTIVE 89/654 - 31/12/1989

**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  
de la destination spécifique du local

pas d'ensoleillement excessif

## 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
- $C_{res}$  convection respiratoire =  $f(t_a, M)$

- $E_{res}$  évaporation respiratoire =  $f(\text{Hum}, M)$
- $C$  convection =  $f(t_a, V_a, \text{clo})$
- $R$  rayonnement =  $f(t_r, \text{clo})$
- $K$  conduction =  $f(t_a, \text{surfaces}, \dots)$
- $E$  évaporation =  $f(\text{SW}, \text{hum}, V_a, \text{clo})$

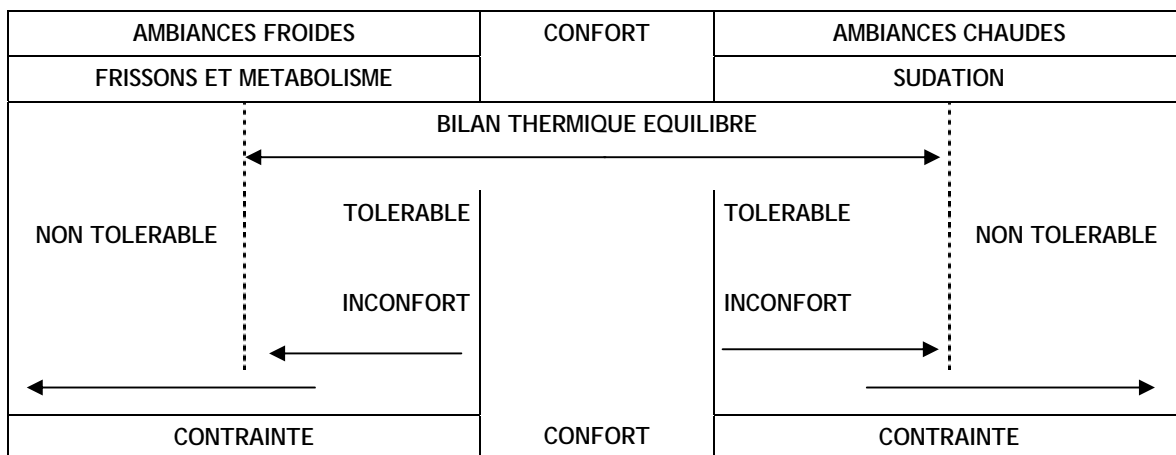
#### 6 paramètres

- climat  $t_a, t_r, V_a, \text{Hum}$
- travail  $M, \text{clo}$

## THERMORÉGULATION

- **Confort:** bilan équilibré pour  $t_{sk}$  et  $E$  optimales
- **Si climat plus chaud**
  1. vasodilatation: sang à la peau
  2. sudation: risque de déshydratation  
Bilan équilibré: ajustements comportementaux ( $\text{clo}, \dots$ )
  3. bilan déséquilibré  
stockage: hyperthermie
    - syncopes
    - crampes
    - coups de chaleur
- **Si climat plus froid**
  1. vasoconstriction: peau isolante  
Bilan équilibré: ajustements comportementaux
  2. FRISSON
  3. Refroidissement hypothermie

## AMBIANCES THERMIQUES FROIDES, NEUTRES ET CHAUDES ET RÉPONSES PHYSIOLOGIQUES CORRESPONDANTES.



## EFFETS LIÉS AU TRAVAIL AU FROID ET AU CHAUD

Domage	Commentaire - gravité
Hypothermie	Lorsque la température centrale descend en dessous de 35°C, de nombreuses fonctions vitales peuvent être menacées, voire détériorées: gravité importante en dessous de 32°C
Engelures	Lorsque la température des doigts, des mains et des pieds descend en dessous de 15°C, enflure douloureuse avec parfois ampoules et crevasses: gravité moyenne
Frissons	Mouvements involontaires produits par l'organisme lorsque la

	sensation de froid est trop intense: inconfort sans aucune gravité
Perte de dextérité	Diminution de la capacité de manipulation de petits objets lorsque la température des doigts est inférieure à 24°C
Inconfort par le froid	Sensation de gêne associée à une température de peau en moyenne trop faible: sans gravité
Confort	Sensation neutre - ni chaud ni froid - fortement fonction du climat, de l'activité et des vêtements
Inconfort par le chaud	Sensation de gêne associée à une température de peau en moyenne trop élevée et à une sudation trop abondante
Contrainte à long terme	Situation de travail pour laquelle la durée maximale de travail doit être limitée entre 2 et 8 heures du fait d'une accumulation lente de chaleur ou/et d'une perte hydrique excessive
Contrainte à court terme	Idem pour une durée de travail limitée entre 30 et 120 min. Effet: élévation de température centrale excessive
Déshydratation	Appauvrissement en eau de l'organisme susceptible d'influer sur certaines fonctions physiologiques. Le déficit en eau ne devrait pas dépasser 3% du poids corporel
Hyperthermie	Élévation de la température centrale au-delà de 38°C
Crampe de chaleur	Contraction musculaire due à la perte en sodium au niveau des muscles du fait de la sudation: faible gravité, mais douleur intense. Ce phénomène est rare du fait de la consommation excessive en sel dans l'alimentation générale
Syncope de chaleur	Chute de tension due à l'afflux de sang à la fois aux muscles et à la peau. Gravité fonction des circonstances (chutes, ..). Indique une fragilité manifeste de la personne: peu grave en lui-même
Coup de chaleur	Blocage soudain de la sudation avec élévation brutale de la température centrale. Ce phénomène risque d'apparaître à partir de températures centrales de 39,5°C et est très grave lorsque des températures de 41, 42°C sont atteintes
Contrainte immédiate	Situation de travail dans laquelle la température centrale du travailleur pourrait s'élever de 1°C en moins de 30 min. Une surveillance médicale directe s'impose

## C E N TRANSPOSITION DES NORMES ISO

### *I. DONNEES DE BASE*

- ISO 7726 instruments et méthodes de mesure des grandeurs physiques
- ISO 8996 métabolisme de travail
- ISO 9920 caractéristiques thermiques du vêtement

### *II. 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 Détermination analytique de la contrainte thermique fondée sur la contrainte thermique prédite.

### *III. 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

## EVALUATION DU METABOLISME

1. Mesure  $VO_2$                       cher, encombrant  
    perturbation des conditions de travail
2. Mesure FC                      simple  
    FC = f (dynam, isométr, therm, ...  
    mesure de contrainte cardio-vasculaire globale  
    surestimation de M
3. Décomposition mouvements - postures  
    micro-ordinateur                      -                      papier-crayon
4. Analogie

## METABOLISME DE TRAVAIL

### Rappels

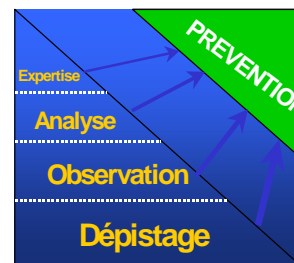
- $1 \text{ l } O_2/\text{min} = 5 \text{ kcal/min} = 300 \text{ kcal/h} = 350 \text{ Watts}$
- homme standard (30 ans, 70 kg, bonne santé)  
    Capacité Maximale de travail: CMT =  $3 \text{ l } O_2/\text{min} = 1 \text{ kW}$
  - femme (30 ans, 55 kg, bonne santé) : CMT = 660W
  - travailleur donné  
    CMT = f (âge, poids maigre, entraînement, ....)
  - En valeurs absolues

100% CMT	5'	5kW			
			lourd	8h	400 W
33% CMT	8h	330 W			
			mi-lourd	8h	290 W
			léger	8h	170 W
	repos	100 W			

- En valeurs relatives

lourd	8h	$100 + 30\% \text{ (CMT - 100)}$
mi-lourd	8h	$100 + 20\% \text{ (CMT - 100)}$
léger	8h	$100 + 10\% \text{ (CMT - 100)}$

## CLASSIFICACIÓN DES MÉTHODES



### ISO 9886

Selon la stratégie *SOBANE*, quatre niveaux:

Comparaison des méthodes de détermination du métabolisme

Niveau	Méthode	Précision
<i>Dépistage</i>	A. Classification selon le métier	Information approximative Risque très grand d'erreur
	B. Classes d'activités	
<i>Observation</i>	A. Tables en fonction des postures et efforts	Risque élevé d'erreur Précision: $\pm 20\%$
	B. Tables pour des activités spécifiques	
<i>Analyse</i>	Evaluation à partir d'enregistrement de la fréquence cardiaque dans des conditions définies	Risque moyen d'erreur Précision: $\pm 10\%$
<i>Expertise</i>	Mesurage de consommation d'oxygène	Erreurs dans les limites de la précision de la mesure ou de l'étude de temps Précision: $\pm 5\%$

Les facteurs principaux affectant la précision sont:

- les différences dans l'équipement de travail
- les variations dans la vitesse de travail
- les différences de techniques de travail et de compétences professionnelles
- les différences de genre et de caractéristiques anthropométriques
- les différences culturelles
- les différences entre observateurs et leur niveau de formation
- en utilisant le niveau 3, la précision de la relation entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène, et la présence d'autres facteurs influençant la fréquence cardiaque

## Niveau 1, *Dépistage*

- **Evaluation du métabolisme par professions.**

Variations importantes en raison de différences de technologie, de nature exacte du travail, d'organisation du travail...

Métabolisme pour différentes professions

Métier		Métabolisme (watts)
Artisans	Maçon	200 - 290
	Charpentier	200 - 310
	Vitrier	160 - 230
	Peintre	180 - 230
	Boulangier	200 - 250
	Boucher	190 - 250
	Horloger	100 - 130
Mines	Mineur de charbon	200 - 400
	Ouvrier de four à coke	210 - 310
Sidérurgie	Ouvrier de haut fourneau	310 - 400
	Ouvrier de four électrique	220 - 260
	Mouleur manuel	250 - 430
	Mouleur à la machine	190 - 300
Métallurgie	Ouvrier de fonderie	250 - 430
	Forgeron	160 - 360
	Soudeur	130 - 220
	Tourneur	130 - 220
	Foreur	140 - 250
	Mécanicien de précision	130 - 200

Imprimerie	Imprimeur	125 - 170
	Relieur	135 - 200
Agriculture	Jardinier	200 - 340
	Conducteur de tracteur	150 - 200
Transport	Conducteur de voiture	125 - 180
	Chauffeur de bus	135 - 225
	Conducteur de tramway	145 - 210
	Grutier	115 - 260
Divers	Aide de laboratoire	150 - 180
	Enseignant	150 - 180
	Vendeur	180 - 220
	Secrétaire	125 - 150

- **Evaluation du métabolisme par catégories:**

5 classes de métabolismes: repos, léger, moyen, lourd, très lourd.  
Qualificatifs utilisés pour un travail EN CONTINU de 8 h (en tenant compte des pauses habituelles). Ils n'ont pas de sens pour un travail occasionnel de quelques instants.

*Exemple:* monter un escalier est un travail

- très lourd s'il doit être fait pendant 8 h en continu
- c'est tout à fait acceptable si cela dure 30 secondes.

Ces activités sont censées inclure des pauses de détente courtes.

## CLASSES DE METABOLISME

Classe	Métabolisme watts	Exemples
repos assis repos debout	100 120	
léger	180	<ul style="list-style-type: none"> <li>• travail de secrétariat</li> <li>• travail assis manuel léger (taper sur un clavier, dessiner, coudre,...)</li> <li>• travail assis avec de petits outils, inspection, assemblage léger</li> <li>• conduite de voiture, opération d'une pédale, ...</li> <li>• forage, polissage légers de petites pièces</li> <li>• utilisation de petites machines à main</li> <li>• marche occasionnelle lente</li> </ul>
moyen	300	<ul style="list-style-type: none"> <li>• travail soutenu des mains et des bras (clouage, vissage,...)</li> <li>• conduite d'engins, tracteurs, camions, ...</li> <li>• manutention occasionnelle d'objets moyennement lourds</li> <li>• marche plus rapide (3,5 à 5,5 km/h)</li> </ul>
lourd	410	<ul style="list-style-type: none"> <li>• travail intense des bras et du tronc</li> <li>• manutention d'objets lourds, de matériaux de construction</li> <li>• pelletage, sciage à main, rabotage</li> <li>• marche rapide (5,5 à 7 km/h)</li> <li>• pousser, tirer chariots, brouettes</li> </ul>
très lourd	520	<ul style="list-style-type: none"> <li>• travail très intense et rapide</li> <li>• pelletage lourd, creusage</li> <li>• montée d'escaliers ou d'échelles</li> <li>• marche très rapide, course (&gt;7km/h)</li> </ul>

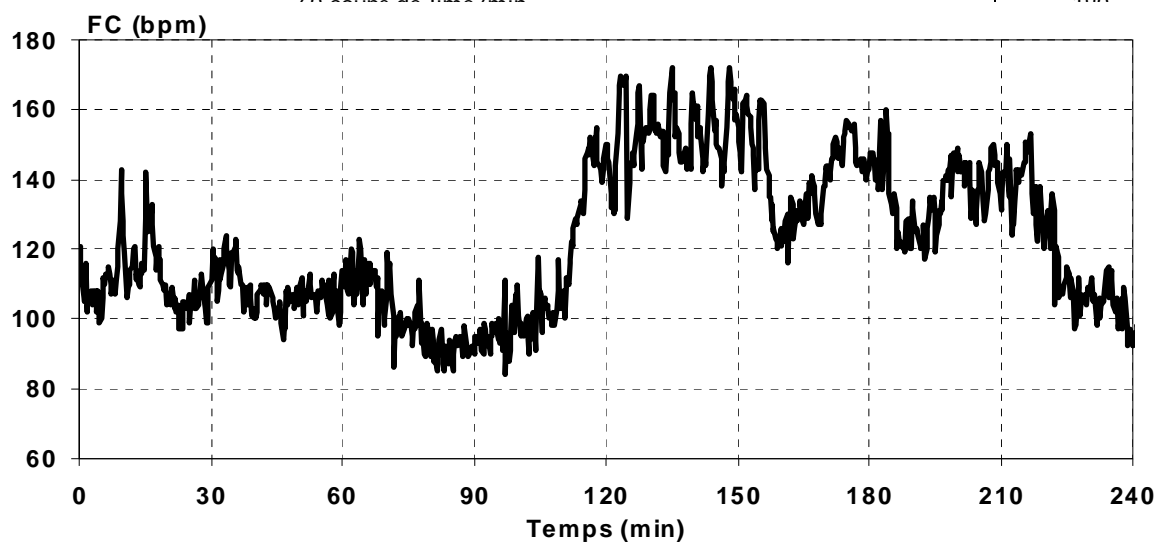
### Niveau 2, Observation

## METABOLISME À PARTIR DE LA CHARGE DE TRAVAIL PAR ZONE CORPORELLE

Zones corporelles impliquées	Travail		
	léger	moyen	lourd
les mains	120	150	170
un bras	180	220	250
les deux bras	240	270	300
le corps	340	460	620

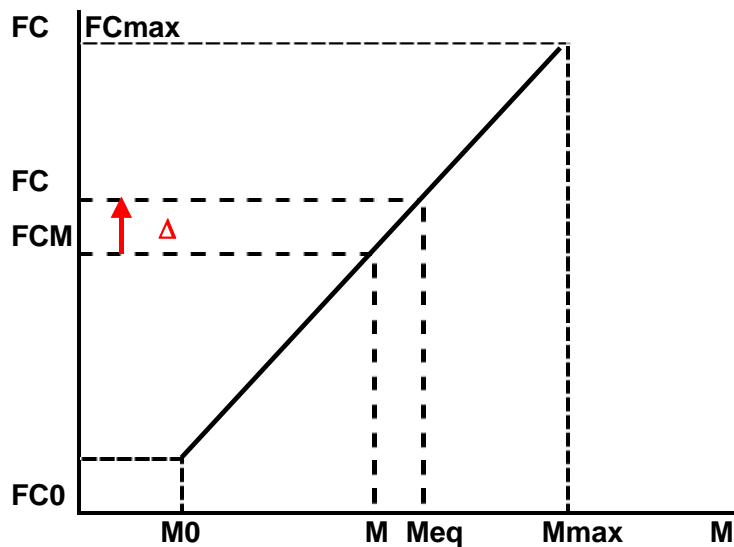
## METABOLISME PAR ANALOGIE

Activités	M (watts)
Sommeil	70
Repos assis	100
Repos debout	125
Marche chemin uni, solide, de niveau	
1. sans charge	
à 2 km/h	200
à 3 km/h	250
à 4 km/h	300
à 5 km/h	360
2. avec charge	
10 kg de charge, 4 km/h	330
30 kg de charge, 4 km/h	450
Marche chemin uni, solide, en montée	
1. sans charge	
5° inclinaison, 4 km/h	320
15° inclinaison, 3 km/h	380
25° inclinaison, 3 km/h	540
2. avec charge 20 kg	
15° inclinaison, 4 km/h	490
25° inclinaison, 4 km/h	740
Descente à 5 km/h, sans charge	
5° inclinaison	240
15° inclinaison	250
25° inclinaison	320
Echelle 70° vitesse 11,2 m haut/min	
non chargé	520
20 kg de charge	650
Pousser ou tirer des wagonnets, 3,6 km/h, chemin plat, solide	
force de poussée : 12 kg	520
force de poussée : 16 kg	670
Porter une brouette, chemin uni, 4,5 km/h, bandage en caoutchouc, 100 kg de charge	410
Limer du fer	
42 coups de lime/min	100
20 coups de lime/min	100



## Evaluation du métabolisme à partir de la FC

### INTERPRETATION



$$FC = FC_0 + dFC_M + dFC_{isom} + dFC_{th} + dFC_n + \varepsilon$$

$$= F_{C_M} + \Delta$$

$M_{eq} = M$  qui sur bicyclette ergométrique donne la même FC  
surestimation = protection

- FC et métabolisme au repos:
  - Métabolisme de repos assis  $M_0 = 100$  W (hommes et femmes).
  - FC de repos assis  $FC_0 = 75$  bpm ou  $FC_{99}$  dépassé pendant 99% du temps d'observation
- FC maximale et CMT
  - $FC_{max} = 205 - 0.62 \text{ âge}$  (220 - âge)
  - $CMT = (18 - 0.1 * \text{Âge}) \text{ Poids}$  (hommes)
  - $(14.5 - 0.1 * \text{Âge}) \text{ Poids}$  (femmes)
  - Poids "normal"
    - $P = 0.75 \text{ Taille} + 0.31 \text{ Âge} - 65$  (hommes)
    - $P = 0.64 \text{ Taille} + 0.31 \text{ Âge} - 55$  (femmes)
  - Et poids idéal (nutritionnistes):
    - $P = (3 \text{ Taille} - 250)/4$  (hommes y Femmes)
- $FC = a M + b$   
Où  $a = (FC_{max} - FC_0)/(CMT - M_0)$   
 $b = FC_0 - a \cdot M_0$

#### Validité

- CMT,  $FC_{max}$ ,  $FC_0$  et  $M_0$  approximatifs
- Relation FC-M valable strictement pour des valeurs de FC supérieures à 110-120 bpm.
  - En dessous: effets émotionnels ou autres
- Relation dépendante du groupe musculaire utilisé
- Toujours influence:
  - des conditions thermiques  $\Delta FCT$
  - des efforts statiques  $\Delta FCS$
  - Des autres composants  $\Delta FC_n$  y  $\Delta FC_\varepsilon$

- **Métabolisme équivalent:** métabolisme qui, sur *bicyclette ergométrique*, lors d'une épreuve d'effort, aurait donné lieu à la même valeur de FC que celle observée au poste de travail

Relation Métabolisme (en watts) - Fréquence cardiaque,  
Prédite en fonction de l'âge et du poids du travailleur (femmes et hommes)

Age (ans)	Poids				
	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg
<b>Femmes</b>					
20	5.2 FC-270	6.1 FC-324	6.8 FC-378	7.6 FC-427	8.1 FC-473
30	5.0 FC-257	6.0 FC-311	6.7FC- 361	7.2FC- 410	7.9FC-457
40	4.9 FC-244	5.6 FC-165	6.3 FC-346	7.0 FC-392	7.7 FC-439
50	4.7 FC-229	5.4 FC-279	6.1 FC-328	6.7 FC-373	7.4 FC-418
<b>Hommes</b>					
20	6.7 FC-361	7.6 FC-428	8.5 FC-491	9.4 FC-553	10.1 FC-610
30	6.5 FC-355	7.4 FC-419	8.3 FC-482	9.2 FC-542	9.9 FC-600
40	6.3 FC-346	7.2 FC-410	8.1 FC-472	9.0 FC-531	9.7 FC-587
50	6.1 FC-335	7.2 FC-400	7.9 FC-461	8.8 FC-518	9.5 FC-574

## Niveau 4, Expertise

### MESURAGE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE

Cher et difficile

Perturbe les conditions de travail



## VETEMENTS ORDINAIRES

Vêtements courants	$f_{cl}$	clo	$I_{cl}$ m <sup>2</sup> °C/W
T-shirt, short, caleçon, chaussettes mi-mollet et chaussures de sport	1,10	0,33	0,051
Chemise manches courtes, jupe d'été, slip, bas nylon, sandales	1,26	0,54	0,084
Idem, avec en plus un pull léger, col en V	1,25	0,78	0,121
Robe d'hiver, pull ras du cou en laine, slip, bas, soutien, souliers	1,25	0,93	0,144
Chemise manches courtes, pantalon léger, caleçon, chaussettes légères, souliers	1,16	0,55	0,085
Idem mais avec chemise coton manches longues	1,19	0,61	0,095
Idem mais avec en plus un veston demi-saison	1,23	1,01	
Chemise flanelle, singlet, pantalon flanelle, caleçon, chaussettes, souliers	1,30		
Chemise manches courtes, pull léger col en V, pantalon léger, caleçon, chaussettes, souliers	1,17		
Chemise manches longues, pull léger col en V, pantalon flanelle, caleçon, chaussettes, souliers			

## PROTECTION INDIVIDUELLE

### *I. ISOLEMENT CONTRE LA CHALEUR*

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

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

## II. ISOLEMENT CONTRE LE RAYONNEMENT

- La protection contre le rayonnement s'obtient au moyen de matériaux aluminisés :
  - une peinture aluminisée réduit le rayonnement de 60%;
  - une feuille d'aluminium brillant de 80%;
  - une métallisation à l'aluminium sous vide de 95%.
 Consulter le fabricant pour avoir les caractéristiques réelles.
- Cette réduction est limitée aux surfaces couvertes, soit à :
  - 35% de la surface corporelle par une veste aluminisée;
  - 20% par des manches aluminisées et gants;
  - 40% par un pantalon et des souliers aluminisés.
- 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 aluminé est très rapidement réduite par la salissure, le vieillissement, ...

Taux de réduction des échanges par rayonnement offert par différents textiles spécialement traités contre le rayonnement

Textile	Traitement	F <sub>R</sub>
Coton	Peinture aluminisée	0,42
Viscose	Feuille d'aluminium brillant	0,19
Aramid (Kevlar)	Feuille d'aluminium brillant	0,14
Laine	Feuille d'aluminium brillant	0,12
Coton	Feuille d'aluminium brillant	0,04
Viscose 0,06	Métallisation sous vide à l'aluminium	0,06
Aramid	Métallisation sous vide à l'aluminium	0,04
Laine	Métallisation sous vide à l'aluminium	0,05
Coton	Métallisation sous vide à l'aluminium	0,05
Fibre de verre	Métallisation sous vide à l'aluminium	0,07

## III. 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.

Vêtements de protection thermiques	I <sub>cl</sub>	m <sup>2</sup> °C/W	i <sub>m</sub>
	clo		
Caleçon, pantalon, chaussettes, chaussures, chemise manches longues + tablier aluminisé	0,77	0,119	0,40
Idem mais avec une veste aluminisée (s'arrêtant au niveau des hanches)	1,36	0,211	0,33

Idem mais avec une veste aluminisée (s'arrêtant à mi-mollet)	1,74	0,270	0,30
Caleçon, T-shirt, bleu de travail, chaussettes et chaussures + surpantalon aluminisé + surveste aluminisée	1,48	0,229	-
	accroissement de surface	isolement chaleur sensible	résistance diffusion de la vapeur

## MESURES CLIMATIQUES

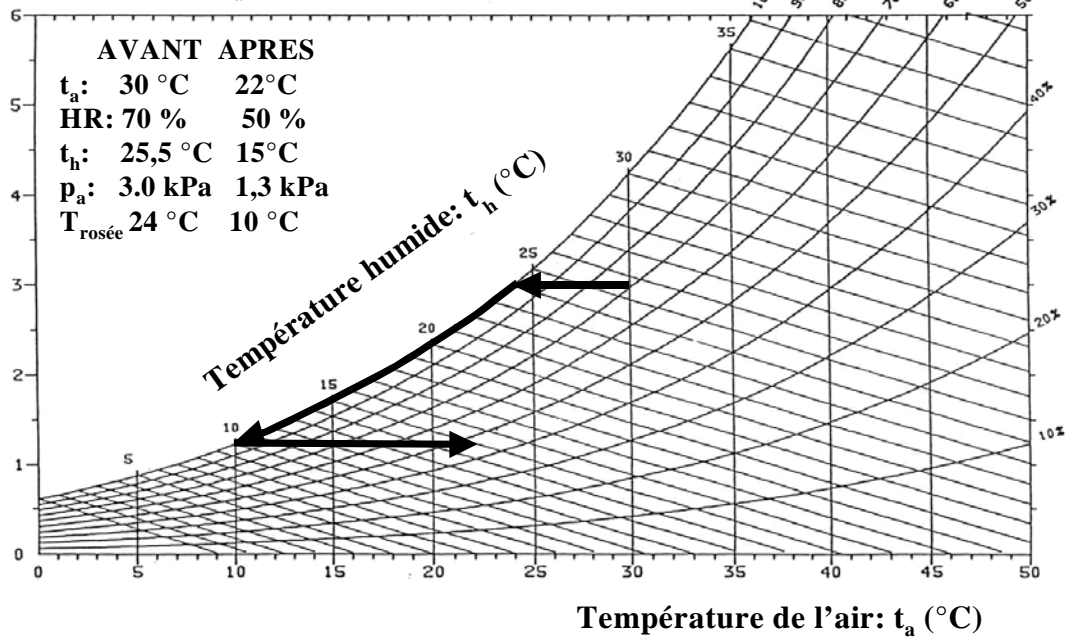
- $t_a$ : **température de l'air** protection contre le rayonnement



- **Humidité**
  - humidité absolue  $x$  g/kg air sec
  - pression partielle de vapeur d'eau  $P_a$  mmHg kPa
  - température de rosée
  - humidité relative  $HR\% = P_a / P_{s,t_a}$

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

Humidité relative: HR (%)

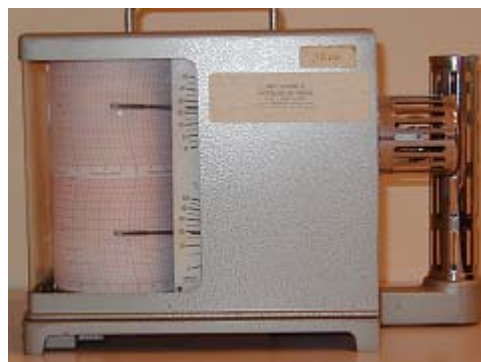


□ température humide  $t_h$

- psychromètre



- thermohygrographe



- **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 mat de 15 cm diamètre influencée par  $t_a$ ,  $R$ ,  $V_a$

Expression mathématique pour passer de  $t_g \rightarrow t_r$ : fonction de ( $t_a$ ,  $V_a$ , diamètre, émissivité)

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8}{D^{0,4} \epsilon_g} V_a^{0,6} (t_g - t_a)} - 273$$



- **Vitesse de l'air**

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



# CONFORT THERMIQUE

## DEFINITION

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

- Par équation du bilan thermique:  $\rightarrow t_a$  optimale en fonction des autres paramètres
- Si  $t_a$  différente  
détérmination du vote moyen prédit  
Predicted Mean Vote PMV  
sensation moyenne

sur échelle

- +3 très chaud
- +2 chaud
- +1 légèrement chaud
- 0 neutre
- 1 légèrement froid
- 2 froid
- 3 très froid

- par programme informatique
- par tables

$M = 93 \text{ W/m}^2 = 1,6 \text{ met} = 170 \text{ W}$  (léger 8 h)

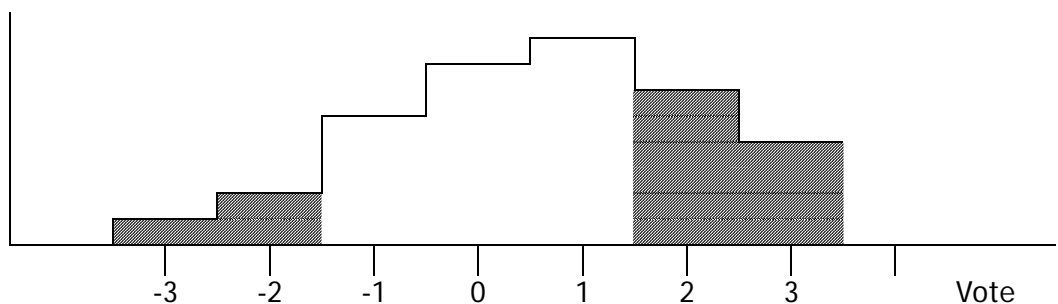
clo	$t_a = t_g$	Vitesse relative	
		0,10	0,20
0,5	18	-0,95	-1,21
	20	-0,49	-0,75
	22	-0,03	-0,27
	24	0,41	0,21
	26	0,85	0,70
	P.M.V.		
1	18	-0,04	-0,20
	20	0,27	0,13
	22	0,59	0,48
	24	0,92	0,83

## VARIABILITÉ

Dans situation  $(t_a, HR\%, R, V_a, M, clo)$

Votes émis

fréquence



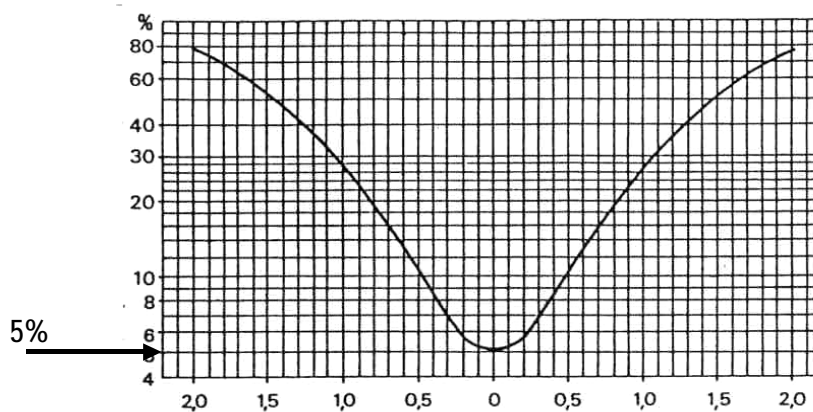
Votes en dehors  $[-1, 0, +1]$  réputés insatisfaits

PMV  $\Rightarrow$  Pourcentage Prédit d'insatisfaits PPD

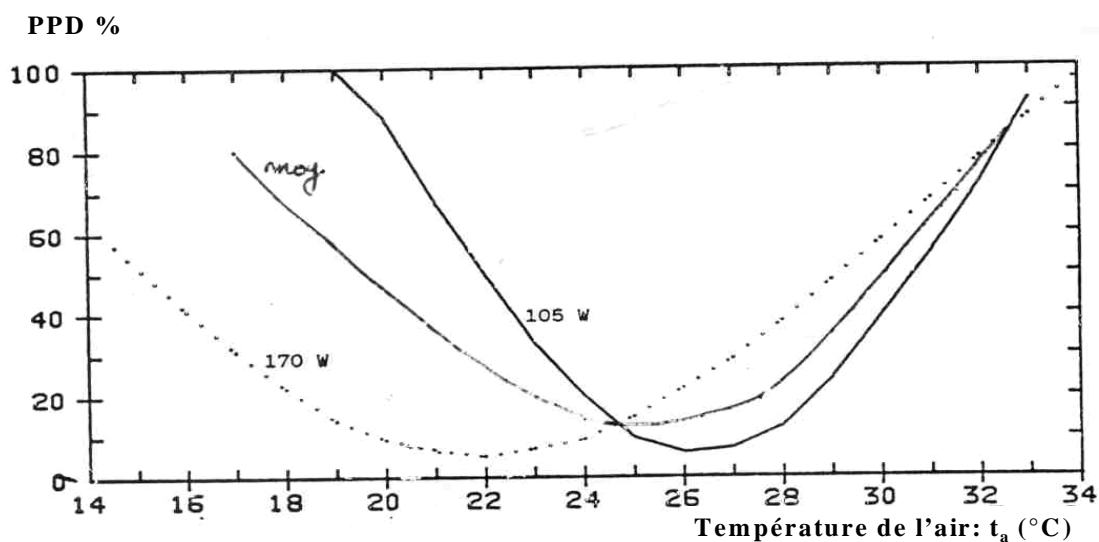
$$M = 93 \text{ W/m}^2 = 170 \text{ W}$$

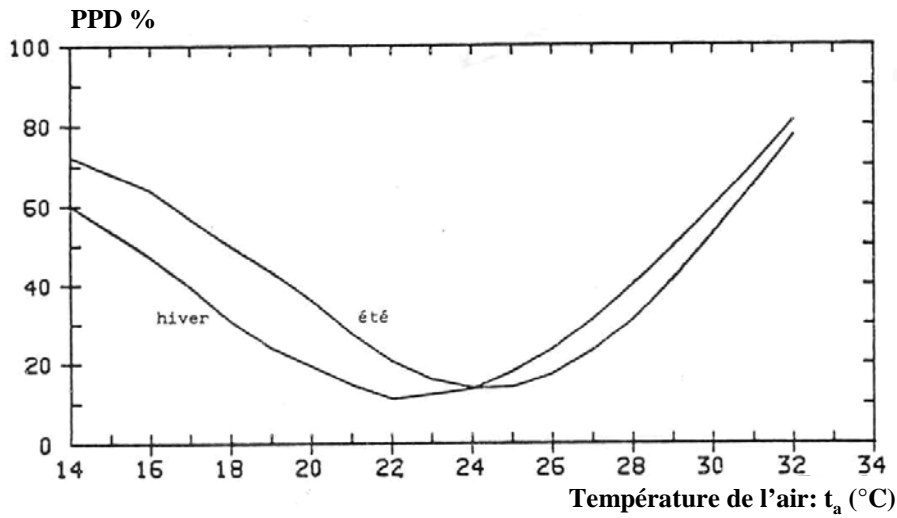
clo	$t_{op}$	Vitesse relative	
		0,1	0,2
0,5	18	25%	38%
	20	10%	27%
	22	5%	7%
	24	9%	6%
	26	21%	18%
	P.M.V.		
1	18	5%	6%
	20	7%	5%
	22	12%	10%
	24	24%	21%
	26	39%	35%

PPD: % prédit d'insatisfaits



PMV: Vote moyen prédit





### Valeurs limites

Dégradation plus importante des performances: - durée

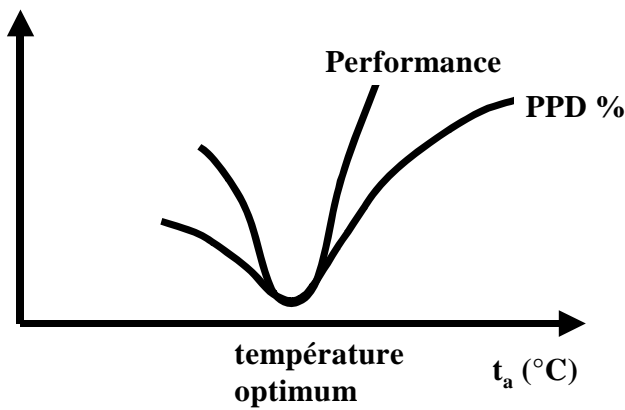
- incidents
- accidents

pour climat plus chaud que plus froid

D'où spécification:

gamme de  $t_a$  telle que [-20%, 10%] PPD

**Inconfort**  
**Performance**



## 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  $V_a = 0,15 \text{ m/s}$   
 humidité relative  $HR = 40\%$   
 ⇒ pour P.M.V. = 0  $P.P.D. = 5\%$   
 $t_a = 21^\circ$   
 Gamme acceptable [18 - 23,5°]
  
- **Bureau en été**  
 on mesure  $t_a = 27^\circ$   $V_a = 0,10$   
 $t_g = 29^\circ$   $HR = 30\%$   
 personnel travail sédentaire 125 W  
 tenue été, chemise légère 0,5 clo  
 ⇒ P.M.V. = 1,3: légèrement chaud  
 P.P.D. = 35%: insatisfaits  
 $t_a$  optimale = 25°C  $t_g = t_a$

## INTÉRÊT

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

## MESURAGES

psychromètre  
 globe noir  
 anémomètre  
 évaluation M + clo

## LIMITES DES PARAMETRES INDIVIDUELS

### Humidité:

40%..... 70% (8 g/kg air sec)  
 assèchement voies respiratoires pollution  
 odeurs (tabac, corps) ↑ microbes  
 poussières, électricité statique ↑ condensation  
 maladies respiratoires  
 ! humidifacteurs (L. pneumophilla)

### 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  $M \nearrow$   $t_{opt} \nwarrow 0,3 \dots 1^\circ\text{C}$
- 1<sup>ère</sup> à 3<sup>ème</sup> heure  $t_a \nearrow 1 \text{ à } 1,5^\circ\text{C}$
- différence intérieur-extérieur en été:  $\leq 6^\circ\text{C}$
- différence  $\Delta t$ 
  - plafond  $16^\circ$
  - radiateurs  $30^\circ$

vitres -20°

- $\Delta (t_r - t_a) \leq 3^\circ\text{C}$

## CONTRAINTE THERMIQUE

Intégration de  $(t_a, \text{HR}\%, R, V_a, M, \text{clo})$  dans indices:  
échelle de sévérité  
prédiction du risque

### I. Indices analytiques

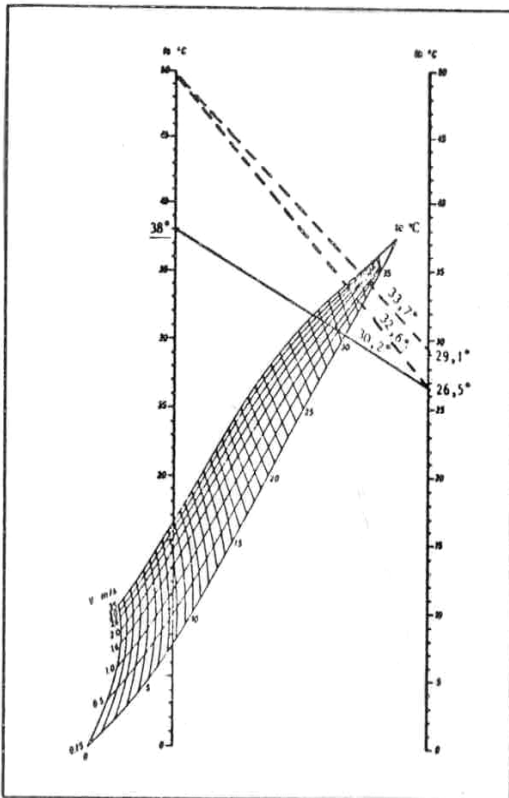
mesures individuelles des facteurs climatiques

- A. empiriques:  $T_{\text{eff}}$   $P_4\text{SR}$
- B. bilan thermique: HSI  
ITS  
 $SW_{\text{req}}$   
PHS

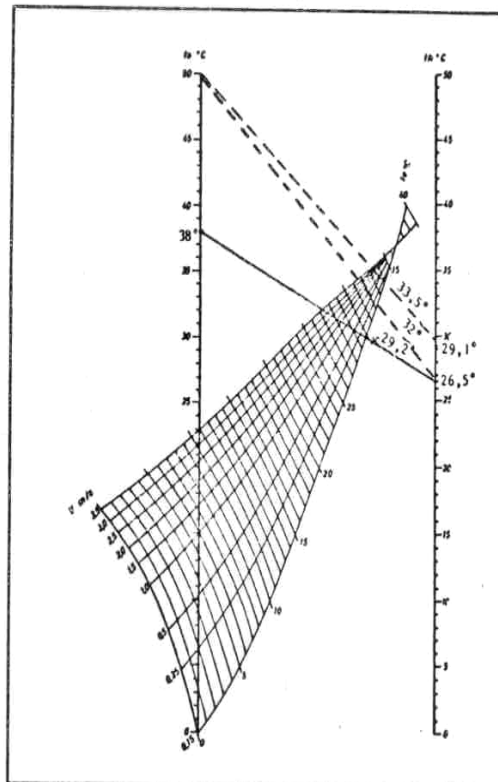
### II. Indices intégrateurs empiriques

mesure global des facteurs climatiques  
WBGT

Abaque de température effective (sujets au repos, vêtus normalement)



Abaque de température effective (sujets au repos, nus jusqu'à la ceinture)



## INDICES BASES SUR BILAN THERMIQUE

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

- $E_{req}$  évaporation requise  
chaleur à perdre par évaporation pour bilan thermique équilibré  
 $E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R$
- $E_{max}$  évaporation maximale  
chaleur pouvant être perdue au maximum compte tenu des conditions climatiques et si peau totalement mouillée
- $SW_{req}$  sudation requise pour maintenir l'homéothermie
- $SW_p$  sudation prédite au temps t  
compte tenu - du temps de réponse  
- de la capacité de sudation
- Q: chaleur accumulée au temps t du fait de la sudation insuffisante

Perte hydrique au temps t

Température centrale au temps

### PRÉDICTION POUR

- 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°C
  - pour que probabilité de 39,2°C = 1/10 000 =  $10^{-4}$
  - probabilité de 42°C = 1/10 000 000 =  $10^{-7}$
  - 39,2°C risque de modifications physiologiques réversibles importantes (coup de chaleur)
  - 42°C séquelles physiologiques

### CRITIQUE

- Modélisation critiquable (clo, ...) améliorable
- (?) difficile à assimiler à utiliser
- ordinateur
- Modèle le plus élaboré le plus puissant
  - organisation du travail DLE périodes de repos
  - recherche des améliorations

# W B G T

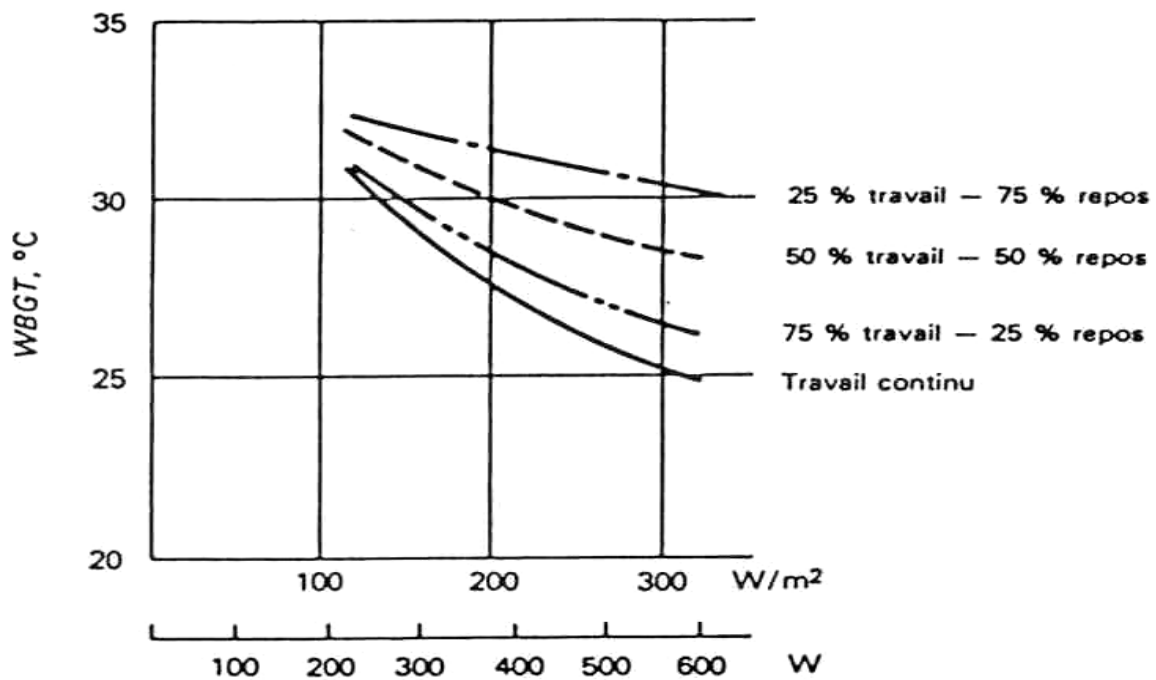
$$\begin{aligned}
 \text{WBGT} &= 0,7 t_{\text{hm}} + 0,3 t_{\text{g}} && \text{sans R solaire} \\
 &= 0,7 t_{\text{hn}} + 0,2 t_{\text{g}} + 0,1 t_{\text{a}} && \text{avec R solaire}
 \end{aligned}$$

Exemples:

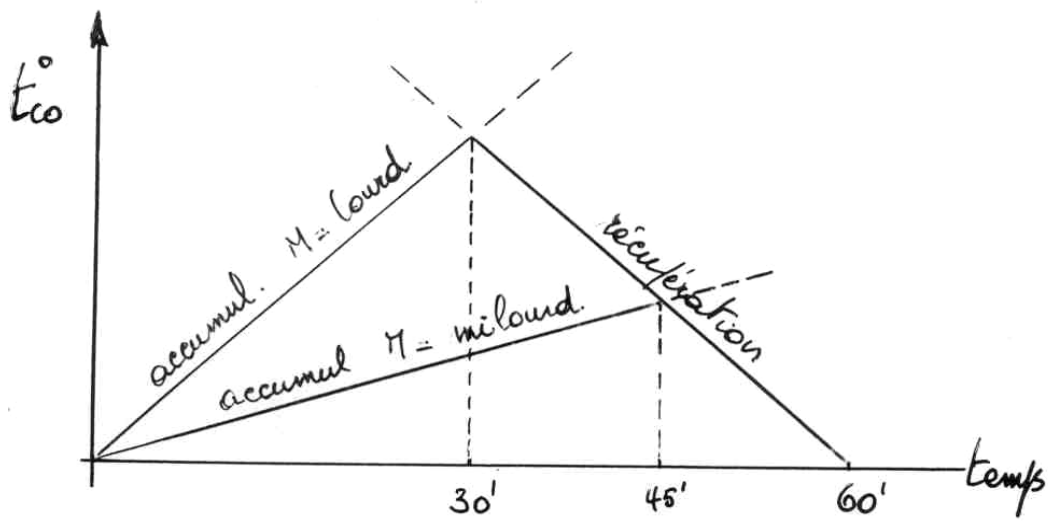
$t_a$	$t_g$	$t_h$	$V_a$	WBGT
30	30	18	0,15	22,3
35	35	20	0,15	25,2
35	51	23	0,10	34,9

Limites

M	Acclimaté		NON acclimaté	
	air calme	courant d'air	air calme	courant d'air
< 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	



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



## ALTERNANCES TRAVAIL REPOS

Ambiance travail	WBGT	WBGT <sub>lim</sub>	dWBGT = WBGT - WBGT <sub>lim</sub>
Ambiance repos	WBGT'	WBGT' <sub>lim</sub>	dWBGT' = WBGT' - WBGT' <sub>lim</sub>

durée totale = durée travail + durée repos

$$K \approx \frac{\text{durée travail}}{\text{durée tot}} \approx \frac{dWBGT'}{dWBGT - dWBGT'}$$

1<sup>er</sup> exemple

travail	WBGT	= 34	M	= milourd	WBGT <sub>lim</sub>	= 26	dWBGT	= 8
repos		= 27		= repos		= 32	dWBGT'	= 5

$$K = \frac{5}{5 + 8} = 38\% \rightarrow 23' \text{ travail, } 37' \text{ repos}$$

2<sup>ème</sup> exemple: repos sur le lieu de travail

travail	WBGT	= 30	M	= milourd	WBGT <sub>lim</sub>	= 26	dWBGT	= 4
repos		= 30		= repos		= 32	dWBGT'	= 2

$$K \approx \frac{32 - WBGT}{32 - WBGT_{lim}}$$

$$K = \frac{2}{6} = 33\% \rightarrow 20' \text{ travail, } 40' \text{ repos}$$

REPOS ASSIS SUR le lieu de travail

## CRITIQUE

- représentativité de t<sub>hn</sub> et t<sub>g</sub>  
reproductibilité
- validité
- 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

## 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.

## AMELIORATIONS TECHNIQUES

### 1. Rayonnement

- 1° ↙  $t_{\text{surf}}$  isolation thermique
- 2° ↙  $\epsilon$  couleur lisse brillante
- 3° écran opaque - treillis/vitre

### 2. Vitesse

- < 1 m/s position debout, travail lourd;  
exposition continue
- < 3 m/s exposition intermittente
- < 10 m/s exposition courte

### 3. Température et humidité

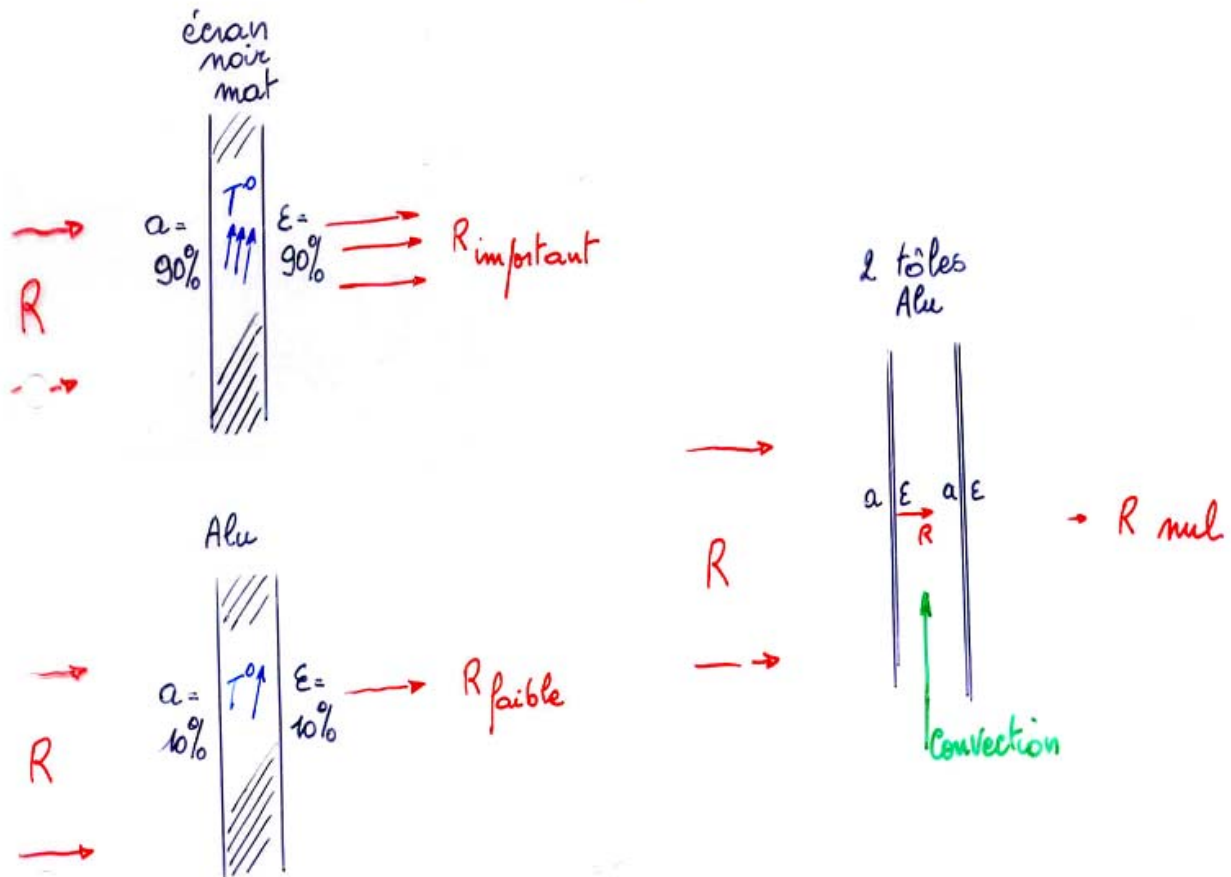
- réduction des apports externes
  - parois opaques, toits isolation thermique  
réflexion  
refroidissement
  - fenêtres orientation  
réflexion  
verres spéciaux  
absorption IR
- réduction apports internes
  - isolation thermique conduites ...
  - aspiration locale ( $t^\circ$ , humidité)
  - ventilation générale

### 4. Vêtement léger adapté confortable

### 5. Charge de travail

## REDUCTION DU RAYONNEMENT

### Réduction du Rayonnement



## ADAPTATION DE L'ORGANISATION DU TRAVAIL

1. Programmation des opérations
  - heures les plus fraîches
  - périodes de l'année les plus froides
    - identification des travaux
    - ajustement des horaires
2. Optimisation cycle travail-repos
  - organisé prédictif  $SW_{req}$
  - spontané (après formation)

PAS de primes
3. Amélioration de la tolérance physiologique
  - acclimatement
  - rehydratation
4. Formation et encadrement des travailleurs



## CONTRAINTE THERMIQUE SEVERE

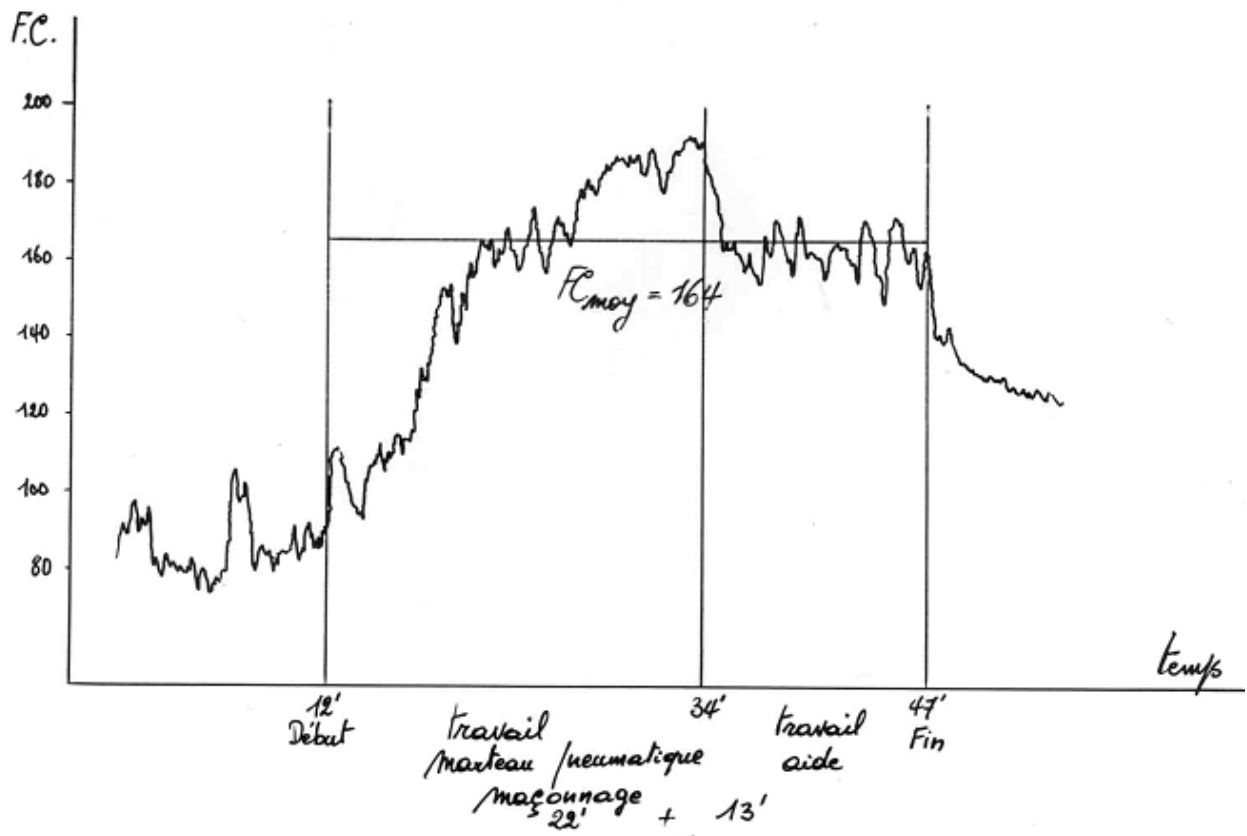
Age	45 ans	$FC_{max}$	= 177 bpm
		$FC_{lim}$	= $FC_{max} - 20 = 157$ bpm
Taille	171 cm		
Poids	85 kg	Poids normal	77 kg
		Excédent	8 kg

$M_{max}$  prédit en f(45 ans, 77 kg): 1030 Watts

$FC_{repos}$  =  $FC_{99}$  = 77

$M_{repos}$  = 105 W

d'où relation  $FC = f(M)$



## INTERPRÉTATION GLOBALE

$FC_{moy}$  = 164 bpm

$M_{eq}$  = 907 W

% CMT = 88%

Durée limite permise: 11 min

Critique

Relation (FC-M) pour efforts  
Utilisée quand effet thermique

$M_{eq} = 907$  W : FAUX !

Reflet de pénibilité globale ??

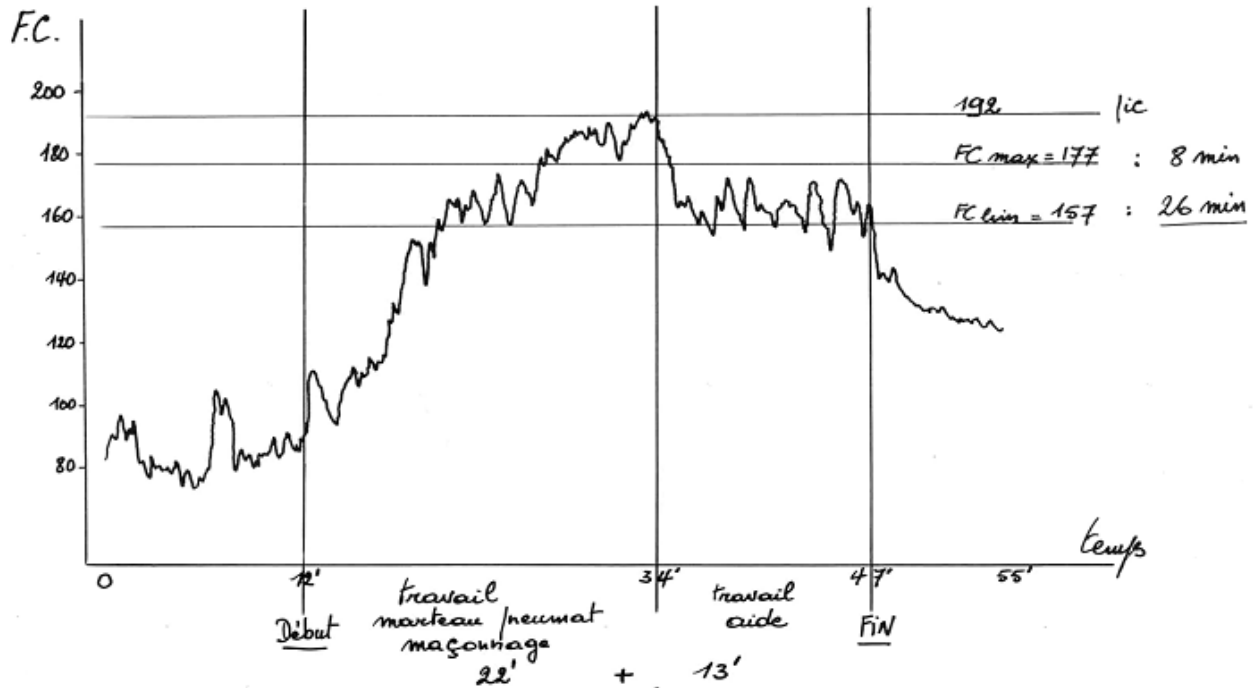
## INTERPRÉTATION

## 1ER CRITÈRE: $FCLIMITE = FC_{MAX} - 20$

$FC_{max}$  = 177 dépassée pendant 8 min  
 $FC_{lim}$  = 157 dépassée pendant 26'/35' de travail

Conclusion:

- profil de FC inacceptable  
..... travail inacceptable pour ce travailleur



## 2ÈME CRITÈRE: ASTREINTE THERMIQUE

$FC_{4\text{ème min récup}}$   $\cong 130$   
 $FC_{repos}$   $\cong 77$   
 $\Delta FC_{th}$  = 53 bpm

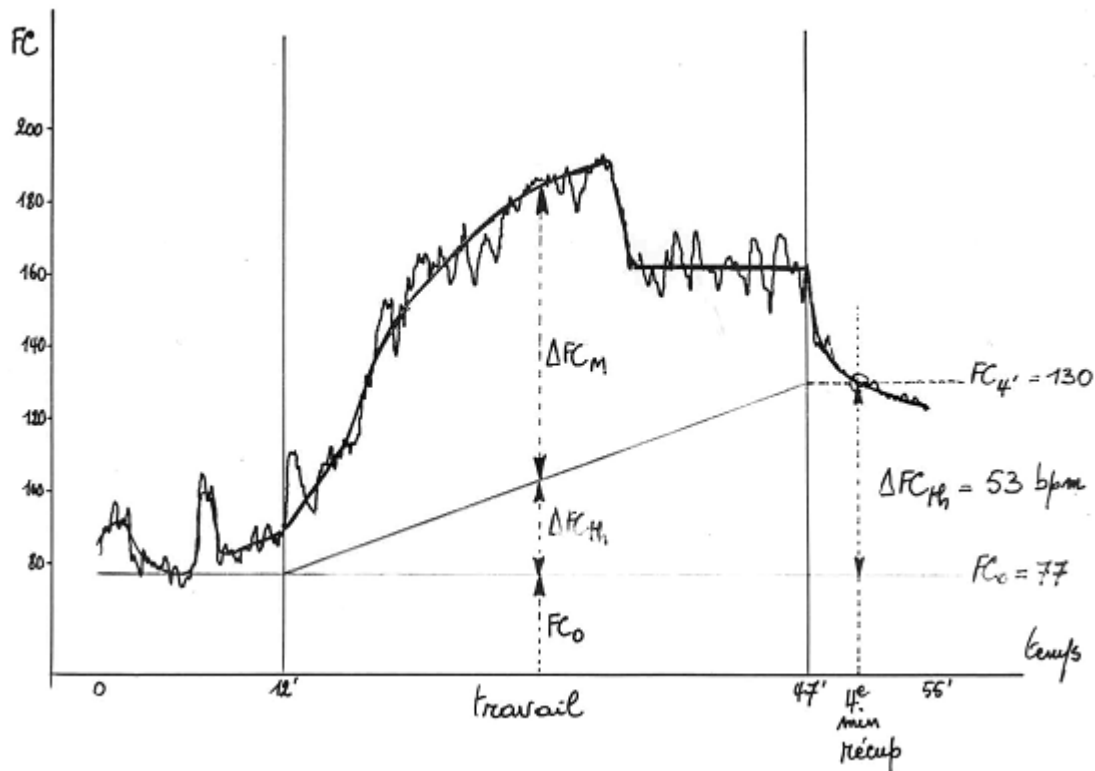
or en moyenne 33 bpm en plus quand élévation  $t^{\circ}_{corp} = 1^{\circ}C$   
TRES variable

$\Delta t^{\circ}_{corp} = 53/33 = 1,6^{\circ}$   $t^{\circ}_{finale \text{ du corps}} \cong 38,6^{\circ}$   
TRES imprécis

$t^{\circ}_{corps}$  mesurée ?

Conclusion

astreinte thermique excessive  
conditions de travail inacceptables



### 3ÈME CRITÈRE: CHARGE MÉTABOLIQUE

$FC_{moy}$	=	164
$\Delta FC_{th\ moyen}$	=	$53/2 = 26$
$FC_{moy, M}$	=	$164 - 26 = 138$
$M_{eq}$	=	670 W
% CMT	=	65%
durée limite de travail		56 min
durée réelle		35 min 1*/jour

#### Conclusion

- dépense énergétique acceptable 1 fois par jour
- nécessité d'organiser des périodes de récupération telles que %CMT < 33% sur les 8 h

### GLOBALEMENT:

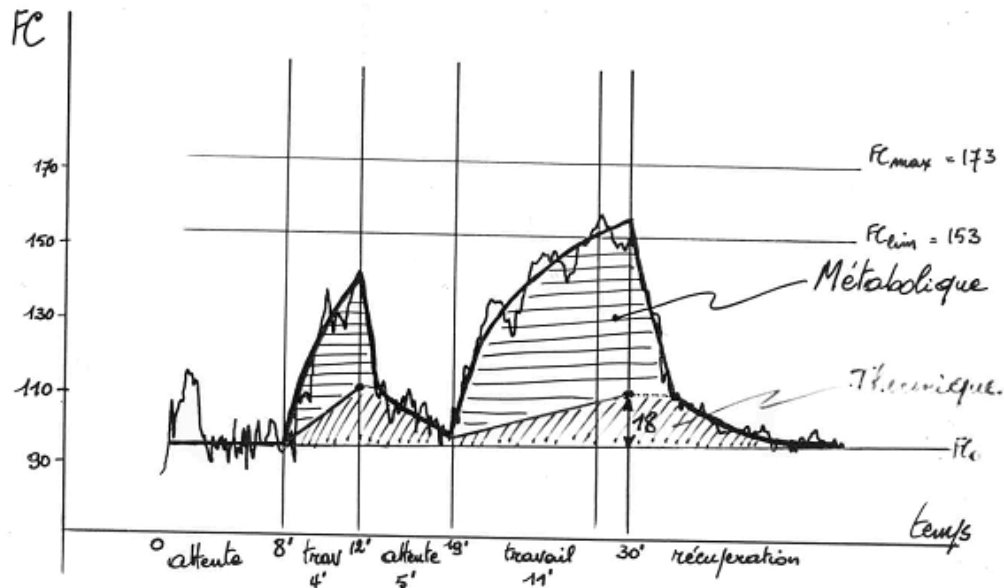
1.  $FC_{lim}$ : dépassement
2. Astreinte thermique: excessive
3. Dépense énergétique: acceptable si récupération

#### Conclusion:

- surveillance individuelle renforcée
- information des travailleurs
- réorganisation du travail
- limitation du temps de travail

## EXEMPLE 2

Age 53 ans  $FC_{max} = 173$  bpm  
 Taille 175 cm  
 Poids 97 kg poids "normal" 82 kg excédent 15 kg  
 CMT 1015 Watts  
 $FC_0 = FC_{99} = 90$



1° dépassement de  $FC_{lim} = FC_{max} - 20 = 153$   
 pendant 1' en fin de travail

2° astreinte thermique

$$\Delta FC_{th \text{ final}} = 18 \text{ bpm}$$

$$FC_{4\text{eme}} = 108$$

$$FC_0 = 90$$

$$\Delta t^{\circ}_{\text{corps}} \approx 0,5^{\circ}\text{C}$$

astreinte légère

3° dépense énergétique

$$FC_{\text{moy générale}} = 128 \text{ (y compris attente)}$$

$$FC_{\text{moy,M}} \approx 118$$

$$M_{eq} \approx 422 \text{ W}$$

$$\% \text{ CMT} = 42\%$$

durée limite: 4 h 30

travail acceptable

**Conclusion**

conditions de travail acceptables

repos intermédiaire

temps de travail limité