



## 1.1. Métabolisme

La chaleur dégagée par le corps humain provient **des réactions d'oxydation des aliments et des frottements musculaires.**

Elle est assez importante et est liée à l'activité mais également à l'individu :

- Age (enfants -20% à -40%)
- Poids ( $\approx 1$  W/kg)
- Sexe (♀ - 20%)
- Santé

Référence : assis - repos : Mth = 105 W

Individu de référence : Homme

70 kg - surface de corps :  $1,8 \text{ m}^2$

Remarques : Métabolisme rapporté au  $\text{m}^2$  de corps  $\rightarrow \text{W/m}^2$

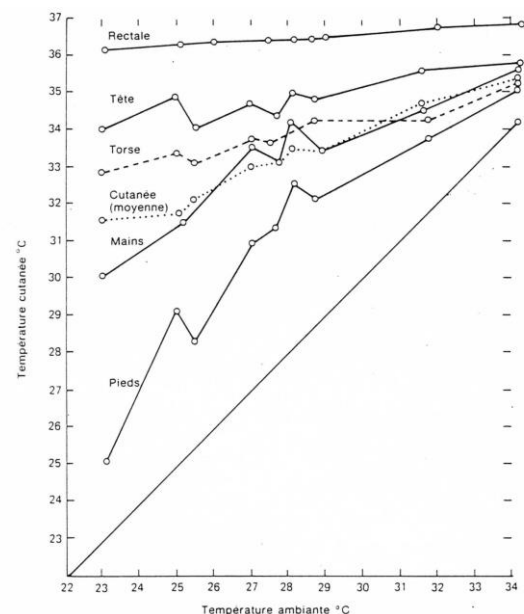
Unité : 1 Met équivaut à  $58 \text{ W/m}^2$

Activité	M (W)	Mth (W)	W (W)
Sommeil	75	75	0
Assis, au repos	105-110	105-110	0
Debout, relax	125-130	125-130	0
Marche (1,6 km/h) pente 5 %	250	230	20
Marche rapide (4,8 km/h) pente 5 %	420	375	45
Marche forcée (6,4 km/h) pente 5 %	640	580	60
Travail de laboratoire	170	170	0
Travail sur machine outil	290	260	30
Vente	210	200	10
Enseignement	170	170	0
Travail de pelletage	460	390	70
Creusement de tranchées	630	510	120
Activité dans la maison	180	180	0
Secrétariat	125	125	0
Gymnastique	360	330	30
Danse slow	125	125	0
Danse rock	460	460	0
Tennis	480	450	30
Squash	750	700	50
Basket ball	790	750	40
Assis, écriture	125	125	0
Debout, travail léger des bras	180	160	20

ACTIVITE	M	
	$\text{W/m}^2$	met
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Repos, debout	70	1,2
Activité légère, assis (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Activité moyenne (travail lourd sur machine, travail de garage)	165	2,8

Exemples de valeurs du métabolisme, avec sa décomposition élémentaire en métabolisme thermique et énergie mécanique.

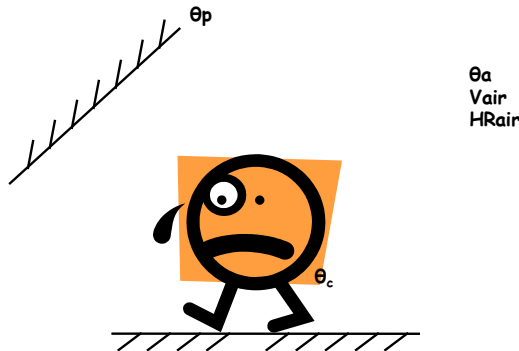
Remarque : Le corps n'est pas isotherme :



## 1.2. Les échanges corps-ambiance

Soit un sujet nu ou très peu vêtu.

Soit  $\theta_c$  sa température de surface du corps (ou de la peau) supposée uniforme (pour simplifier).



A compléter

### a) Rayonnement $\Phi_{ray}$

La peau échange de la chaleur par rayonnement avec les surfaces environnantes ( $\theta_p$ ).

(On montre par exemple :  $\Phi_{ray} = 7,2 (\theta_c - \theta_p)$ )

### b) Convection $\Phi_{conv}$

La peau échange de la chaleur par convection avec l'air du local ( $\theta_a$ ).

La convection peut être libre, forcée ou mixte.

(On montre par exemple :  $\Phi_{conv} = 5,6 (\theta_c - \theta_a)$ )

### c) Conduction $\Phi_{cond}$

La peau échange de la chaleur par conduction entre les pieds et le sol.

Echange faible, en général **négligé** dans le bilan global. Mais il peut provoquer un .....  
 ..... Si la personne est assise ou couchée, l'échange est plus important.

### d) Evaporation $\Phi_{évap}$

La peau échange de la chaleur par évaporation.

L'eau liquide s'évapore en prélevant la chaleur de vaporisation  $L_v$  au corps, **ce qui permet d'éliminer** .....

Une partie de cet échange existe de manière permanente par la saturation de l'air dans les poumons et la ..... cutanée  $\Phi_{resp}$ .

L'autre est liée par l'apport de sueur (transpiration) à la surface de la peau  $\Phi_L$ .

Les lois de l'évaporation montrent que la masse évaporable est liée .....

(On montre par exemple :  $\Phi_L = 0,05 v (p_{vs} - p_{va})$  avec  $v$  : % de corps mouillé, et  $p_v$  : pression de vapeur).

### 1.3. Bilan thermique du corps

Le corps humain est un **système** ..... ( $\theta$  interne constante  $\approx 37^\circ\text{C}$ ).

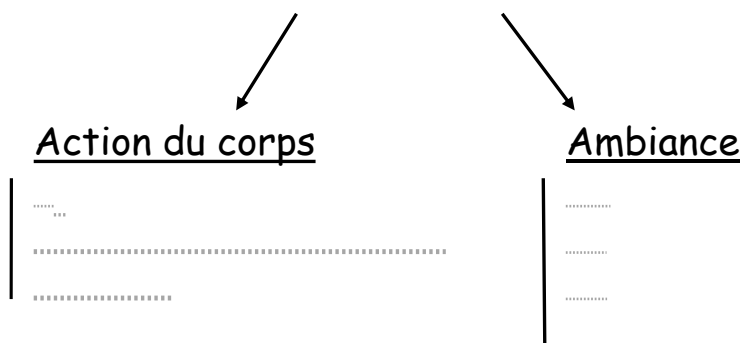
⇒ **Bilan équilibré à chaque instant.**

Il doit ..... exactement la même quantité de chaleur que son métabolisme.

Il faut :

Termes  $> 0$  sortant du corps

Pour réaliser cet équilibre :



### 1.4. Actions du corps

Actions réflexes mécanismes thermorégulateurs du corps (Hypothalamus).

#### a) Température $\theta_c$

Grâce au réseau sanguin superficiel →  $\theta_c$  peut varier

Au total  $\approx 15000$  capteurs de températures superficielles.

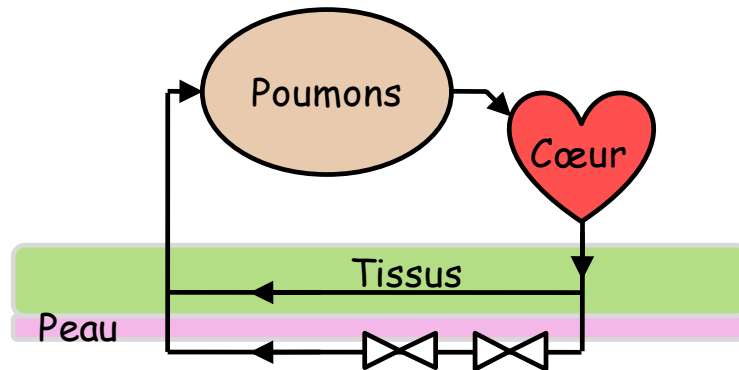
Si le bilan global conduit à un :

- Echauffement du corps :

Glandes de Ruffini (détecteurs de chaleur) → provoquent la dilatation du système sanguin → **vasodilatation** ⇒ ↗ de la circulation ⇒ on devient rouge.

- Refroidissement du corps :

Glandes de Krause (détecteurs de froid) → provoquent la contraction du système sanguin → **vasoconstriction** ⇒ ↘ de la circulation ⇒ on devient pâle.



→ Action fondamentale limitée dans son amplitude.

b) Surface mouillée v% (**Transpiration**)

Sur le corps : 2 500 000 glandes sudoripares.

Déclenchement par zones successives :  $\Phi_L$  ↗

mini : **perspiration cutanée**

maxi : **"en nage"**

2 à 3 litres d'eau par jour maximum.

c) Activité "complémentaire"

- Contre le froid : Action réflexe → **Frisson**  
Action volontaire → **Agitation**
- Contre le chaud : **Repos**

d) Aux limites

- Si l'évacuation de la chaleur reste insuffisante :  $\theta_{interne}$  ↗

"Coup de chaleur" **Hyperthermie**

Tolérance très limitée → Amplitudes 42 à 43°C

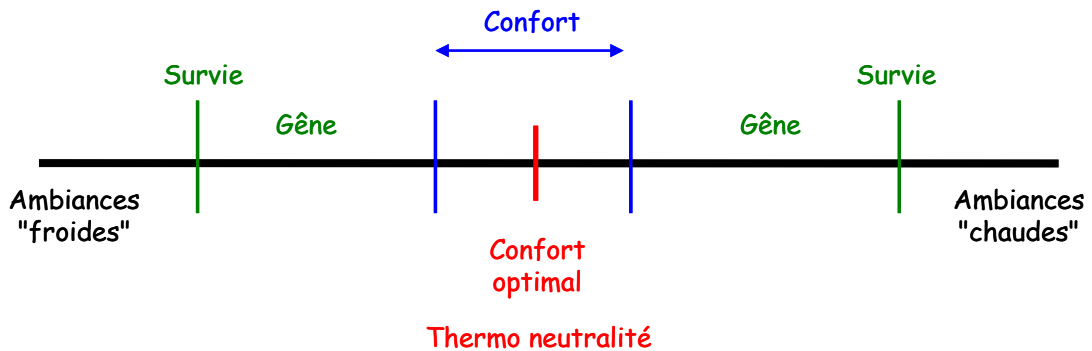
→ Durée quelques minutes → mort

Exemple en milieu du travail → indice des contraintes thermiques

- Si l'évacuation de la chaleur est trop importante :  $\theta_{interne} \searrow$

### Hypothermie

- Derniers recours → Modifications biologiques (ex : brûler les sucres)
- Abandon des extrémités
- 33°C → Perte de connaissance
- 26°C → Mort



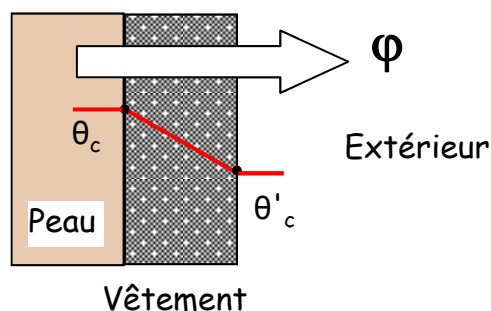
**Confort thermique** → Conditions pour lesquelles les mécanismes thermorégulateurs sont en sollicitation minimale.

## 1.5. Actions de l'environnement

### a) Vêtement

- Assure un abaissement de .....  
(à la place de la vasoconstriction).

⇒  $\Phi_{conv} \searrow$  et  $\Phi_{ray} \searrow$



La chaleur du corps passe par conduction de la surface de la peau à la surface extérieure du vêtement, le flux étant imposé par le métabolisme.

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (\theta_c - \theta'_c) \quad \text{W/m}^2$$

$$\varphi = \frac{\theta_c - \theta'_c}{R_v} \quad R_v : \text{résistance du vêtement}$$

$\varphi$  et  $R_v$  sont donnés.

Exemple :

$M_{th} = 150 \text{ W}$  et  $S_c = 1,8 \text{ m}^2$  soit  $\varphi = 83,3 \text{ W/m}^2$

Si  $e = 1 \text{ mm}$  et  $\lambda = 0,08 \text{ W/m.K}$   $\theta_c - \theta'_c = \dots\dots\dots$

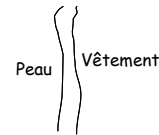
Si  $e = 4 \text{ mm}$   $\theta_c - \theta'_c = \dots\dots\dots$

Clo :

$R_v \Rightarrow$  unités "physiologiques" **clo**  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2.\text{K/W}$

Remarque : le nombre de clo n'est pas vraiment la  $R_v$  du vêtement :

$\rightarrow$  Il y a la lame d'air entre la peau et le vêtement



$\rightarrow$  Et il est supposé réparti sur la surface totale du corps  $\rightarrow$  **additivité**  
(avec plusieurs vêtements : chaussures, pull, caleçon, ...)

$1 \text{ clo} \approx$  vêtue normale d'intérieure

**b) Maîtrise des paramètres de l'ambiance intérieure**Ambiance

$\theta_a$	}	Équipements techniques et Isolation de l'enveloppe
$\theta_p$		
$V$		
HR%		

Une ambiance ne peut être qualifiée du point de vue du confort thermique que par les données des 4 paramètres significatifs :  **$\theta_a$ ,  $\theta_p$ ,  $V$ , HR%**

$\theta_a$  : échanges par convection et évaporation

$\theta_p$  : échange par rayonnement

$V$  : rôle important en convection et évaporation

HR% : apparaît dans les lois de l'évaporation ( $p_{v0}$ ) et valeurs des constantes physiques de l'air

**c) Destination des locaux**

$\rightarrow$  Activité des occupants.

$\Rightarrow$  **Prise en compte** dans l'action sur l'environnement.

## 2. Température résultante sèche

Echanges "secs" (chaleur sensible) →  $\Phi_{\text{conv}}$  et  $\Phi_{\text{ray}}$

$$\Phi_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} \cdot S_c \cdot (\theta_c - \theta_a) \quad [\text{W}]$$

$$\Phi_{\text{ray}} = h_{\text{ray}} \cdot S_c \cdot (\theta_c - \theta_p) \quad [\text{W}]$$

$$\Phi_{\text{sens}} = h_{\text{conv}} \cdot S_c \cdot (\theta_c - \theta_a) + h_{\text{ray}} \cdot S_c \cdot (\theta_c - \theta_p)$$

En posant :

$$h = h_{\text{conv}} + h_{\text{ray}}$$

$$\theta_{rs} = \frac{h_{\text{conv}} \cdot \theta_a + h_{\text{ray}} \cdot \theta_p}{h_{\text{conv}} + h_{\text{ray}}}$$

On obtient :

$$\Phi_{\text{sens}} = h \cdot S_c \cdot (\theta_c - \theta_{rs}) \quad [\text{W}]$$

$\theta_{rs}$  : Température résultante sèche

Température fictive de l'ambiance caractérisant (avec h) les transferts sensibles corps/ambiance.

Modèles plus précis : → Influence de la vitesse d'air

$$\theta_{rs} = \frac{\theta_p + \theta_a \cdot \sqrt{10 \cdot V}}{1 + \sqrt{10 \cdot V}} \quad V \text{ [m/s] : vitesse d'air}$$

Application : local en air calme  $V \approx 0,1 \text{ m/s}$  ⇒

Conclusion :

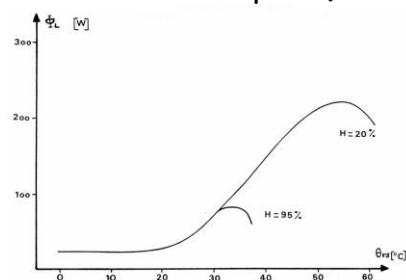
Ambiance

$\theta_a$   
 $\theta_p$  }  $\theta_{rs}$   
 $V$   
 HR%

➤ V varie peu autour de 0,1 m/s (local et ventilation de bonne conception)

➤ HR% de l'air :

Peu influente (en sensation de séjour dans les conditions normales d'une ambiance intérieure en France métropolitaine)



➔  $\theta_{rs}$  est un bon indicateur de la qualité thermique des ambiances intérieures courantes.



### 3. Conditions intérieures à réaliser

Prendre en compte → Activités  
 → Vêtue  
 →  $\theta_a, \theta_p$  ( $\theta_{rs}$ )  
 → V  
 → HR%

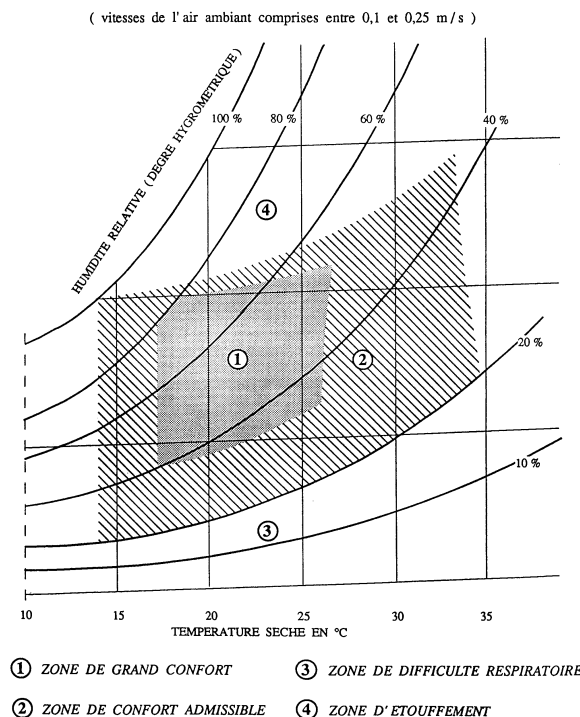
Compromis éventuel → **Satisfaction de l'utilisateur**  
 → **Économie d'énergie**

Remarque : Il y aura toujours des gens insatisfaits. Tout le monde n'a pas le même confort thermique !

Le principal objectif des installations thermiques (chauffage et climatisation) est

Mais la sensation de confort est une notion très **subjective**.

Après une série de tests auprès d'un échantillonnage de population, des chercheurs ont pu établir ..... **c'est-à-dire des zones de température et d'humidité agréables au plus grand nombre.**

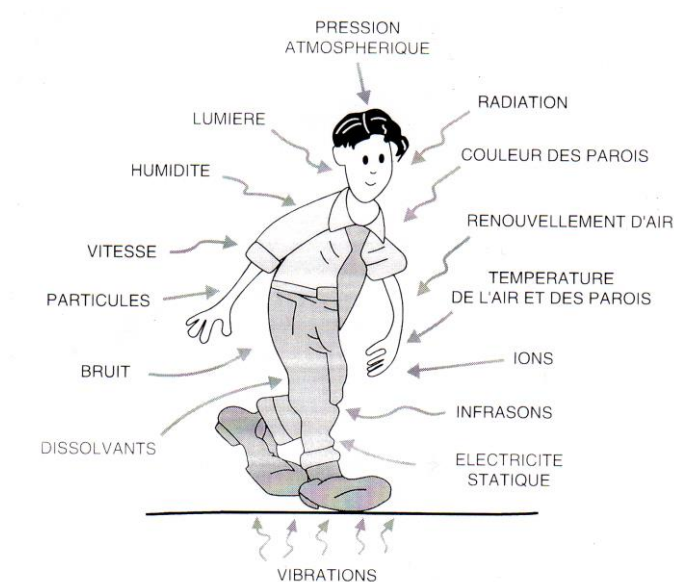


*Limites de températures et d'humidité relative en climatisation de confort*

On distingue deux plages de confort : le régime hiver et le régime été.

Ces tests ont aussi permis de définir les principaux facteurs de confort.

### 3.1. Les principaux facteurs de confort



Ces facteurs de confort peuvent être diversement liés :

- A l'installation de climatisation ou de chauffage
- A l'aménagement du local
- A la conception du bâtiment et à son environnement

### 3.2. Les facteurs de confort liés au conditionnement de l'air

Pour être efficace, l'installation doit prendre en compte :

- .....
- .....
- .....
- .....
- .....

#### a) Qualité de l'air

A l'intérieur d'un local, la pollution de l'air provient de différentes sources :

- ..... : bio-effluents d'origine humaine ou animale, odeurs de cuisine, fumée de tabac, effluves chimiques...
- .....

Travail lourd :	45 l/h/pers. de CO <sub>2</sub>
Travail léger :	25 l/h/pers. de CO <sub>2</sub>
Repos :	20 l/h/pers. de CO <sub>2</sub>

La teneur en CO<sub>2</sub> ne doit pas dépasser 0,15%.

#### ➤ La concentration en gaz carbonique provenant de l'activité humaine

- L'amélioration de l'étanchéité des bâtiments récents (limitation des renouvellements d'air incontrôlés = concentration des matières = sensation de confinement).

Les moyens de contrôle actuels restent très inefficaces pour détecter l'existence des polluants ; la seule source de mesure fiable en matière de pollution olfactive est l'odorat humain.

On peut néanmoins, par filtration au niveau de la centrale de traitement d'air, augmenter la qualité de l'air du point de vue des particules en suspension (poussières...).

## b) Température

Un écart entre la température de l'ambiance et celle du corps humain est nécessaire

- en été : **écart suffisant pour** .....
- en hiver : **écart limité pour** .....

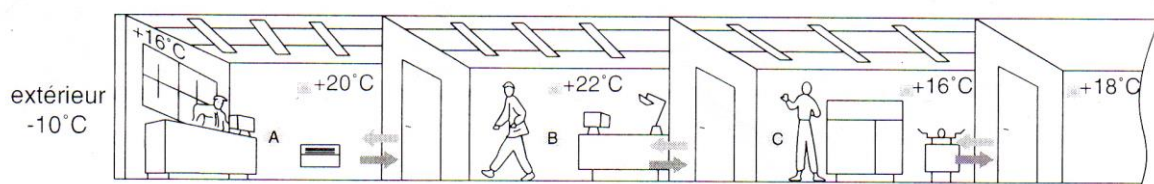
La valeur de la température d'ambiance est fonction du type d'activité et de la nature des vêtements.

Activité	Température	
	Tenue légère d'été	Tenue d'intérieur d'hiver
Assis au repos	25 à 28 °C	21 à 25 °C
Activité légère assise	23 à 26 °C	19 à 23 °C
Activité debout (sans effort physique)	20 à 24 °C	15 à 21 °C
Activité debout (avec effort physique modéré)	17 à 22 °C	11 à 18 °C

La norme NF ISO 7730 permet de calculer la température de confort pour différentes valeurs d'activités et de tenue vestimentaires types

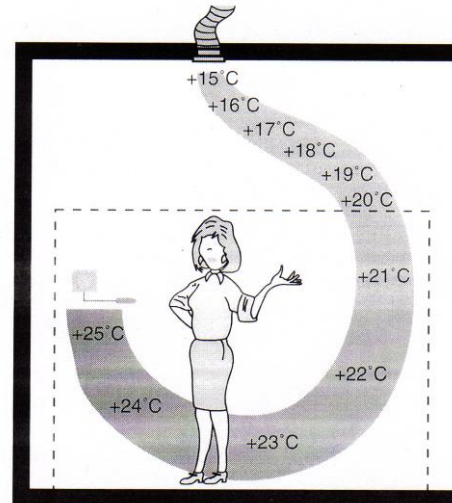
Des variations trop importantes de température dans l'espace ou dans le temps contribuent à la sensation d'inconfort.

Exemple de sensibilité aux écarts de température dans l'espace :



- **A**, qui est assis dos à la paroi froide (+ 16 °C), a une sensation de froid.
- **B** a une sensation de froid en passant de son bureau (+ 22°C) à celui de A (+20°C).
- **C**, qui travaille debout à un poste non sédentaire, est à l'aise dans son bureau (+ 16°C) ; en revanche, il a une sensation de chaleur en pénétrant dans le bureau de B (+22°C).

Il est donc très important de veiller à la température de soufflage de l'air et aux positions des bouches de soufflage et de reprise de l'air. La température dans le volume où évolue le sujet doit se situer dans la plage de confort.



### c) Humidité relative

L'humidité relative est perçue différemment selon la température du local :

Température	Effets de l'humidité relative
Température moyenne	L'humidité relative a une influence limitée dans les températures de la zone moyenne de confort (20 à 30 °C) où elle peut varier de 40 à 60 %.
Haute température	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une humidité relative haute crée une sensation d'étouffement.</li> <li>• Une humidité relative basse provoque une sensation de dessèchement, surtout au niveau des muqueuses.</li> </ul>
Basse température	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une humidité relative haute provoque une réaction frileuse.</li> <li>• Une humidité relative basse dessèche la gorge.</li> </ul>

Par ailleurs, une ambiance très sèche (humidité absolue basse) favorise le phénomène d'électricité statique.

### d) Vitesse de l'air

**Le corps humain est excessivement sensible à la vitesse de l'air et notamment à la sensation de courant d'air.**

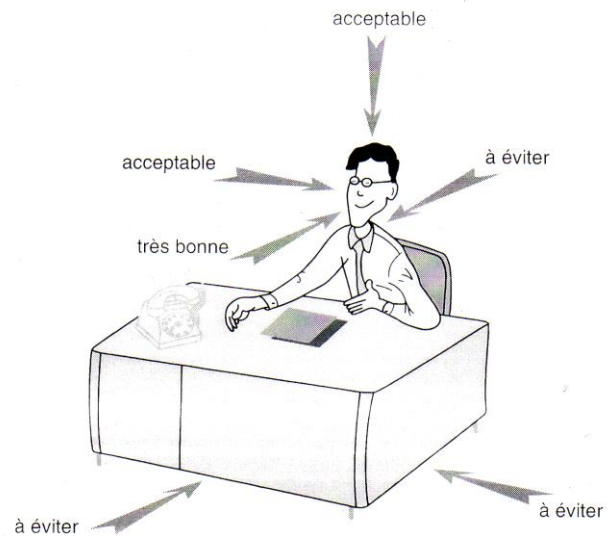
Cette sensation de courant d'air dépend :

- Du type d'activité : une personne assise est beaucoup plus sensible aux courants d'air qu'une personne en mouvement.
- Du type de vêtement porté : la protection en est plus ou moins efficace.

Le phénomène de convection à la surface du corps humain augmente avec la vitesse de l'air refroidissant ainsi plus vite le corps et favorisant le phénomène d'évaporation cutanée.

Avec la notion de vitesse d'air, intervient celle des zones sensibles du corps humain. Certaines parties du corps non protégées par des vêtements sont particulièrement fragiles et sensibles aux courants d'air : chevilles, nuques, cheveux...

La disposition de bouches de diffusion doit tenir compte du phénomène.



### e) Niveau sonore

Une installation de climatisation peut entraîner une nuisance sonore :

- bruit d'air
- bruit d'eau
- bruit mécanique.

Parfois même, l'intermittence du bruit augmente la nuisance car elle crée un effet de surprise.

## 3.3. Les facteurs de confort liés à l'aménagement du local

L'aménagement intérieur d'un local contribue beaucoup au confort de ses occupants mais reste indépendant de l'installation de climatisation.

Trois facteurs concourent au bien-être :

- ❑ La couleur :  
Les couleurs "chaudes" ou "froides" des peintures et des revêtements muraux jouent un rôle essentiel sur le plan psychologique.
- ❑ L'espace visuel :  
L'impression d'espace visuel résulte des dimensions du local et de ses proportions et de la présence ou non de la lumière du jour (locaux aveugles ou fenêtres condamnées sont souvent très désagréables).
- ❑ L'éclairage :  
La luminosité du local et le choix des appareils d'éclairage contribuent non seulement au confort mais aussi à l'efficacité du travail et à la sécurité

### 3.4. Les facteurs de confort liés à conception du bâtiment

Les facteurs de confort liés à la conception d'un bâtiment sont, en grande partie, ceux de l'installation de climatisation :

- qualité de l'air
- niveau sonore
- température.

C'est pourquoi, dès l'étude préalable à la construction ou de la rénovation, il faut vérifier l'adéquation entre le futur bâtiment et le type de climatisation que l'on veut installer.

❑ La qualité d'air :

La qualité des huisseries et l'étanchéité des parois réduisent la pollution externe.

❑ Le niveau sonore :

La composition des parois et l'inertie des matériaux de revêtement ont également un effet sur le niveau sonore.

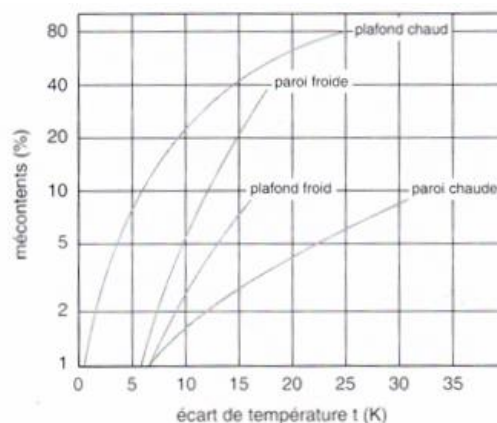
❑ La température :

L'isolation thermique du bâtiment, ainsi que l'épaisseur et la nature des vitrages ont une conséquence directe sur la température ambiante. L'insolation directe à travers les vitrages est à étudier.

Il faut aussi prendre en compte d'effet de rayonnement des parois du local :

- les parois froides ont un effet de refroidissement par rayonnement (absorption de chaleur).
- l'asymétrie des rayonnements, c'est-à-dire l'incidence des surfaces à des températures différentes, est mal supportée, notamment en cas de plafond chaud.

Ce graphe indique le taux de mécontentement des occupants d'un local en fonction de la température de rayonnement des parois et du plafond.



Il est donc important de connaître la nature des parois et de l'isolation pour calculer les températures de surface des parois.