

Chapitre II : Confort Thermique

Le confort est un état de bien être général. Il est mesuré *a contrario* par le taux d'insatisfaction des occupants. Indépendamment des conditions propres à l'individu (métabolisme, activité, habillement), il est reconnu que les paramètres suivants interviennent dans le confort, en plus des paramètres qui caractérisent l'individu lui-même (taux d'activité, habillement, etc):

Conditions thermiques: Température de l'air
Sources de rayonnement (radiateurs, poêles, soleil)
Température des surfaces environnantes
Perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps
Qualité de l'air: Vitesse relative de l'air par rapport au sujet
Humidité relative de l'air
Pureté ou pollution de l'air, odeurs
Acoustique: Niveau de bruit, nuisance acoustique
Temps de réverbération (durée d'écho)
Visuel: Éclairage naturel et artificiel
Couleurs
Volumes intérieur et distribution des volumes
Autres influences: Degré d'occupation des locaux
"Ambiance"

II-1 Confort thermique

Le confort est donc une sensation physiologique faisant intervenir plus d'un paramètre. Le confort thermique ne tient compte que des paramètres suivants:

-Les facteurs liés à l'individu:

Son activité et le rendement de cette activité

Son habillement

-Les facteurs liés à l'environnement:

Températures de l'air et des surfaces environnantes

Vitesse relative de l'air et le degré de turbulence

Pression de vapeur d'eau ou humidité relative

En effet, la chaleur dégagée par le métabolisme, plus ou moins grande selon l'activité, est éliminée, directement ou au travers des habits, par convection et conduction vers l'air ambiant, par rayonnement vers les surfaces voisines et par évapotranspiration dans l'air (Figure II.1).

On notera que, dans la zone confortable, les échanges par rayonnement, convection - conduction et évapotranspiration se répartissent en trois parts approximativement égales.

Ainsi, contrairement à ce qui est généralement admis, il est erroné de vouloir satisfaire ces critères de confort par une simple régulation de la température de l'air intérieur de l'habitation.

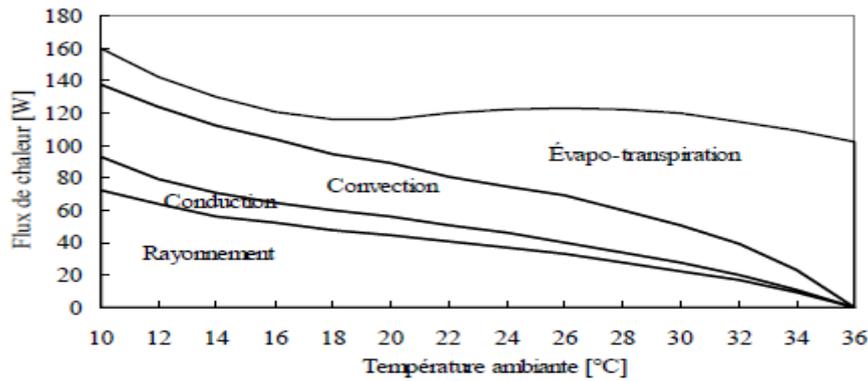


Figure II.1: Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène.

Il est usuel de quantifier la sensation de confort en utilisant l'échelle suivante [Fanger, 1982; EN ISO 7730]:

-3	très froid	insatisfait parce que trop froid
-2	froid	
-1	frais	satisfait
0	confortable	
1	tiède	insatisfait parce que trop chaud
2	chaud	
3	très chaud	

Une autre méthode consiste à compter le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions de confort. Ce pourcentage est directement lié au vote moyen d'une population donnée. On a ainsi deux paramètres permettant de mesurer le confort thermique:

Le **vote moyen prévisible**, appelé PMV (Predicted Mean Vote), qui est l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, sur l'échelle de -3 à +3. Le confort optimal correspond à un PMV nul.

Le **pourcentage prévisible d'insatisfaits**, appelé PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui exprime la part des sujets insatisfaits dans une condition donnée. La Figure II.2 montre la relation entre le PPD et le PMV, qui peut être calculée par la relation empirique suivante:

$$PPD = 1 - 0.95 \exp(-0.003353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2) \quad \text{II-2}$$

A cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales". Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum

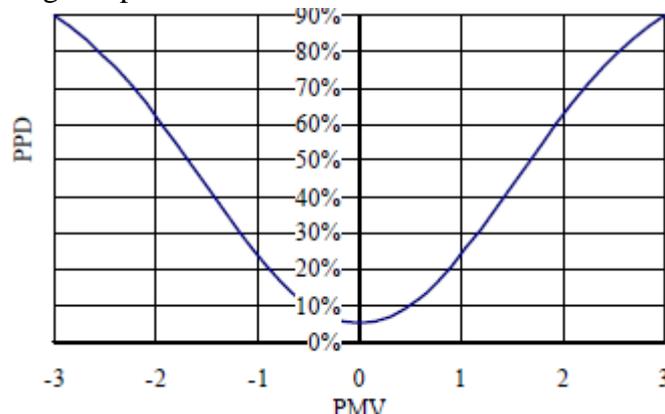


Figure II.2: Relation entre le pourcentage d'insatisfaits (PPD) et le vote moyen (PMV). [EN ISO 7730]

Ainsi, avec un PMV nul, il reste 5 % d'insatisfaits. Ce nombre monte à 10 % pour un $PMV = \pm 0.5$ et 20 % pour un $PMV = \pm 0.84$.

En comparant le vote d'un grand nombre de personnes mises dans des conditions de confort diverses avec leur bilan thermique donné par des relations bien connues de la physique, Fanger [1982] a établi une équation prédisant le PMV à partir des paramètres de confort qui sont énumérés dans la Table II.1 ci-dessous.

Température de l'air.....	θ_a [°C] ou T_a [K]
Température radiante moyenne.....	θ_{mrt} [°C] ou T_{mrt} [K]
Vitesse relative de l'air.....	v [m/s]
Pression partielle de vapeur d'eau.....	p [Pa]
Activité métabolique du sujet.....	M [Watt]
Son travail mécanique fourni.....	W [Watt]
Surface de peau du sujet.....	A [m ²]
Activité spécifique du sujet.....	$m = M/A$ [W/m ²]
Son travail spécifique.....	$w = W/A$ [W/m ²]
La résistance thermique des habits.....	R [m ² K/W]
ou l'habillement.....	[Clo] = $R/0.155$
La fraction de la surface habillée.....	f

Table II.1: Paramètres influant le confort thermique.

L'équation de Fanger est donnée ci-dessous. Dans cette équation, toutes les variables sont exprimées en unités SI.

$$PMV = \frac{(0.303 \exp(-0.036 m) + 0.028) [m-w - 0.00305 (5733 - 6.99 (m-w) - p) - 0.42 (m-w - 58.15) - 0.000017 m (5867 - p) - 0.0014 m (307 - T_a) - F]}{II-2}$$

où la fonction d'habillement F est donnée par:

$$F = 3.96 \cdot 10^{-8} f(T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) + f h (T_{cl} - T_a) \quad II-3$$

Pour le coefficient h de transfert thermique des habits, on prend celle des deux expressions ci-dessous qui donne la valeur la plus grande:

$$h = 2.38 (T_{cl} - T_a)^{1/4} \quad \text{ou} \quad h = 12.06 \sqrt{v} \quad II-4$$

La température (absolue) des habits T_{cl} est donnée en résolvant l'équation implicite:

$$T_{cl} = 308.9 - 0.028 (m - w) - R F \quad II-5$$

La fraction de surface habillée f peut être estimée par :

$$f = 1.00 + 1.290 R \quad \text{si } R < 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$f = 1.05 + 0.645 R \quad \text{si } R > 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad II-6$$

La résolution de l'équation de Fanger nécessite l'usage d'un ordinateur. Ainsi, pour des applications

pratiques, un diagramme de confort a été calculé pour une combinaison courante des paramètres physiques. La Figure II.3 donne la température opérative idéale, c'est à dire celle qui donne un PMV nul en fonction de l'activité et de l'habillement, et ce pour une vitesse de l'air basse (moins de 0,1 m/s) et une humidité relative normale (35 à 65%). Les parties ombrées donnent l'écart acceptable autour de la température idéale tel que $-0.5 < PMV < 0.5$, donc les domaines où il n'y aurait que 10% d'insatisfaits.

La **température opérative** est une moyenne pondérée de la température de l'air et de la température radiante:

$$\theta_{op} = a \theta_a + (1 - a) \theta_r \quad II-7$$

$$\text{Où } a = 0.5 + 0.25v \quad II-8$$

v étant la vitesse relative de l'air.

Il peut arriver que les diverses surfaces délimitant une chambre ne soient pas à la même température. La **température radiante** moyenne en un endroit est la température qu'aurait un corps noir qui entourerait entièrement l'endroit donné et irradierait une petite sphère (noire elle aussi) placée à cet endroit avec la même puissance que celle reçue en réalité par cette sphère.

L'humidité de l'air n'a que peu d'influence sur la sensation de confort tant qu'elle est comprise entre 30 et 70 % et que les autres paramètres de confort donnent un PMV inférieur à 1.

Activité	Dégagement de chaleur		
	[met]	[W/m ²] [†]	[W/pers] [*]
Couché, inactif, sommeil	0,8	46	83
Assis inactif	1,0	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126
Activité légère, debout (magasin, établi, laboratoire)	1,6	93	167
Travail debout (ménage, atelier)	2,0	116	209
Marche (4 km/h)	2,8	162	292
Travail intensif (mécanique lourde)	3,0	174	313
Marche (5 km/h)	3,4	197	354
Course (10 km/h)	8,0	464	834

[†] par rapport à la surface du corps.

^{*} valable pour une personne de 1,8 m² de surface corporelle (par ex. taille 1.7 m, poids 69 kg)

Table II.2 : Taux de métabolisme moyen correspondant à diverses activités [EN ISO 7730]

Pour utiliser l'équation de Fanger, il faut connaître les valeurs des différentes variables. Les températures, l'humidité et la vitesse de l'air se mesurent sur place ou se calculent au moyen de modèles. On utilisera la Table II.2 pour les taux de métabolisme et la Table II.3 pour l'habillement. Ces valeurs ont été mesurées en laboratoire.

Le taux de métabolisme ou l'activité peut être rapporté à un taux conventionnel, par exemple celui d'un individu assis tranquille. L'unité est alors le **met**, qui correspond à une puissance de 58 W dissipée par mètre carré de surface du corps.

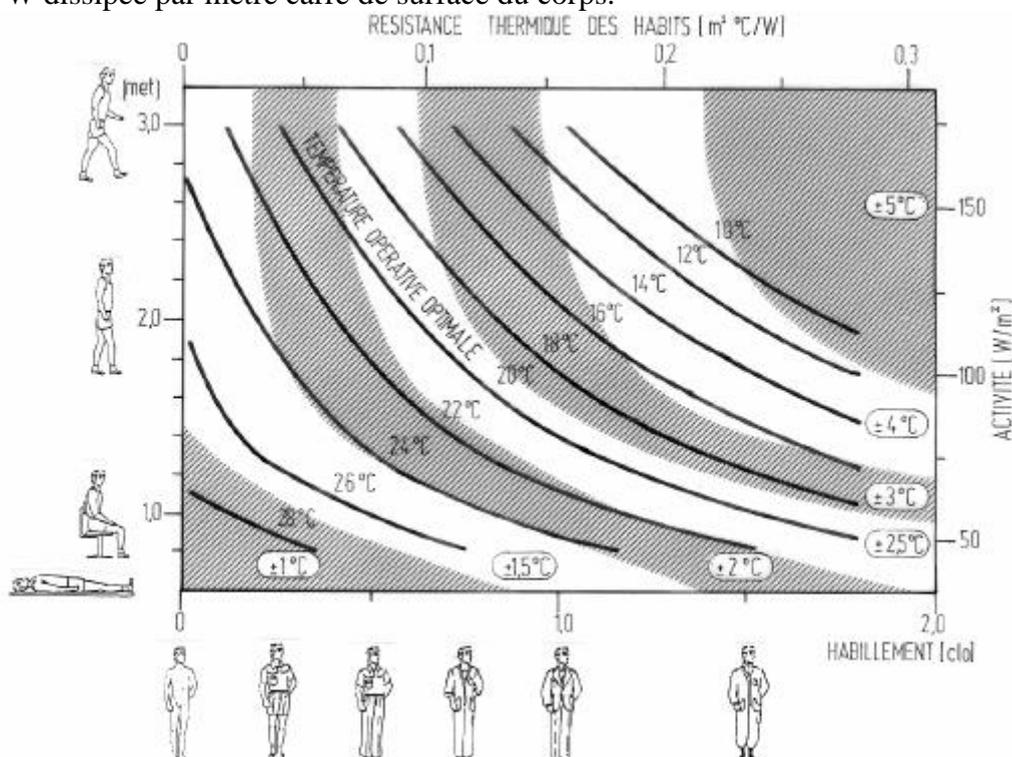


Figure II.3: Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme [EN ISO 7730]. Les valeurs notées dans les ovales, et correspondant pour chacune à une zone du graphique (blanc ou hachuré) représentent l'écart de température (par rapport à la

température opérative idéale) pour laquelle le PMV vaut ± 0.5 . Par exemple pour 1 clo et 1 met, la température opérative idéale est d'environ 23°C, et la zone usuellement considérée comme confortable (PMV ± 0.5) correspond à l'intervalle [21°C;25°C].

Tenue vestimentaire	[clo]	[m²K/W]
Nu, debout	0,0	0,0
Shorts, costume de bain	0,1	0,015
Tenue tropicale: chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0,3	0,045
Tenue d'été: chemise courte, pantalons longs légers ou jupe chaussettes légères et chaussures	0,5	0,08
Tenue de travail légère: sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalons de travail, chaussettes et chaussures	0,7	0,11
Tenue d'intérieur d'hiver: sous-vêtements, chemise à manches longues, pull-over, pantalons ou robe, chaussettes épaisses et chaussures	1,0	0,15
Tenue de ville d'hiver: idem mais sous-vêtements à manches et jambes longues, et veste.	1,5	0,23
Tenue d'hiver fourrée	3,0	0,45

Table II.3: Valeurs en clo pour quelques habillements [EN ISO 7730]

L'habillement représente une résistance thermique entre la surface de la peau et l'environnement.

On peut donc, à l'aide de mannequins chauffants, mesurer cette résistance thermique et l'exprimer en m²K/W. Il est aussi usuel de l'exprimer en **clo** (pour clothing). 1 clo correspond à une résistance thermique de 0.155 m²K/W. C'est la résistance thermique du complet - veston. Quelques exemples sont donnés dans la Table II.3.

L'équation de Fanger est utilisable dans le domaine de variation suivant :

- métabolisme de 46 à 230 W/m² (0.8 à 4 met);
- habillement de 0 à 2 clo pour résistance thermique des habits de 0 à 0.310 m²K/W ;
- température de l'air de 10 à 30 °C;
- température radiante moyenne de 10 à 40 °C;
- vitesse relative de l'air inférieure à 1 m/s;
- pression partielle de vapeur d'eau de 0 à 2700 Pa.

La conséquence pratique pour les bâtiments commerciaux et les logements (où l'activité avoisine 1.1 met) est que la température opérative idéale en hiver (habillement de 1 clo) est comprise entre 20 et 24°C, alors qu'en été (habillement de 0.5 clo) elle est comprise entre 22 et 26°C. Rappelons qu'il ne s'agit pas de la température de l'air seulement, mais d'une combinaison entre celle-ci et la température radiante.