

CONFORT THERMIQUE DANS LES LIEUX DE VIE

AUTEUR : MICHEL LE GUAY

Sommaire

1	Confort et ambiance intérieure	2
1.1	Le corps humain	2
1.1.1	Le métabolisme	2
1.1.2	Régulation thermique du corps humain	3
1.2	Échanges thermiques entre le corps humain et son environnement	5
1.2.1	Respiration	5
1.2.2	Transpiration	5
1.2.3	Conduction	6
1.2.4	Convection	6
1.2.5	Rayonnement	6
1.2.6	Incidence de l'habillement	7
1.3	Équilibre thermique du corps humain	8
1.3.1	Facteurs d'influence	8
•	La température ambiante	8
•	La température radiante moyenne	8
•	La vitesse relative de l'air	8
•	L'hygrométrie de l'air (ou humidité relative)	8
1.3.2	Température résultante	8
1.3.3	Température résultante de confort	9
1.4	Autres critères à satisfaire	11
1.4.1	Vitesse relative de l'air	11
1.4.2	Hygrométrie (ou humidité relative)	11
1.4.3	Ecart de température tête – pieds	11
1.4.4	Rayonnement asymétrique	12

1 Confort et ambiance intérieure

1.1 Le corps humain

1.1.1 Le métabolisme

L'être humain comme tous les animaux à sang chaud conserve une température interne pratiquement constante, malgré les variations importantes de son environnement.

Ceci est possible grâce au métabolisme¹ qui extrait des aliments, l'énergie nécessaire à l'organisme. Cette énergie prend alors deux formes : la chaleur (pour maintenir la température du corps) et le travail musculaire (interne pour soutenir le squelette et externe pour transmettre des forces aux objets). La production thermique est permanente mais est toujours liée à l'activité physique de la personne. Plus le travail musculaire est intense et plus la production de chaleur est importante.

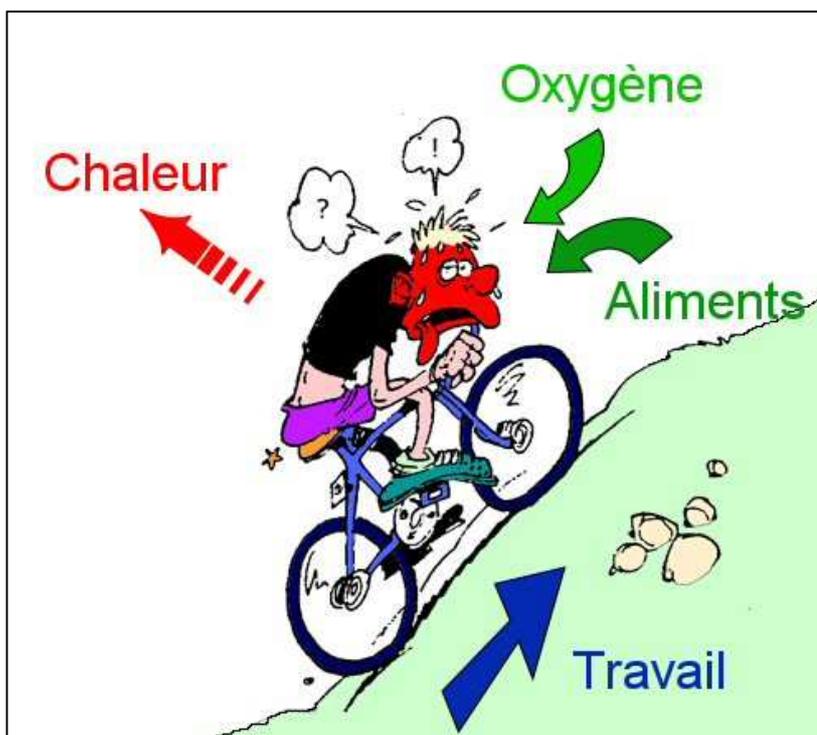


Figure 1 : Illustration de l'association travail - chaleur



Le métabolisme basal désigne la production d'énergie d'un être humain assis, au repos².

Activité	Niveau d'activité (nombre de fois le métabolisme basal)	Puissance pour une personne moyenne (70 kg et 1,70 m) [W]
Sommeil	0,7	74
Couché, au repos	0,8	84
Assis, au repos	1	106
Assis, travail mental	1,1	116
Debout, au repos	1,2	127
Debout, activité légère (achat, laboratoire, industrie légère)	1,6	169
Debout, activité moyenne (vente, travail ménager, travail sur machine)	2	211
Debout, activité soutenue (travail de garage)	3	317
Marche 4 km/h	2,2	232
Course 10 km/h	7,6	800
Course 25 km/h	43	4 500
Course 30 km/h	105	11 000
Football	10,3	1080
Nage 1,6 km/h	5,4	570

Le métabolisme est évalué indirectement, en mesurant le débit d'air respiré. Plus l'effort physique est intense et plus les muscles consomment d'oxygène apporté par la respiration.

En fait, le travail musculaire ne représente qu'une toute petite part du métabolisme, l'énergie principale étant dégagée sous forme de chaleur. Un sportif très performant ne parvient même pas à produire 20 % de son métabolisme sous forme de travail externe. Une personne au repos, ne fournit aucun travail extérieur ; tout son métabolisme est converti en chaleur.

1.1.2 Régulation thermique du corps humain

La température interne normale est d'environ 37 °C chez une personne au repos, le matin. Durant la journée, sa température augmente progressivement d'environ 1 °C, pour redescendre pendant son sommeil. Tout effort musculaire entraîne une élévation de température ce qui favorise le fonctionnement des muscles.

La chaleur interne du corps se transmet jusqu'à la peau, par conduction à travers les tissus mais surtout par la circulation sanguine.

Des capteurs thermiques situés principalement dans la peau, envoient des signaux nerveux au cerveau, plus particulièrement à l'hypothalamus. Cette partie du cerveau assure le rôle de régulateur et, en réaction à une variation de température ressentie, est capable de déclencher un grand nombre de processus.

En cas de baisse de température, il se produit :

- Redressement des poils : La « chair de poule » est une tentative dérisoire d'augmenter l'épaisseur de notre fourrure.
- Frissonnement : Ce travail musculaire provoque un réchauffement d'environ 3 fois le métabolisme basal.
- Mouvement : Taper des pieds sur le sol ou se frotter les mains, augmente le métabolisme et transforme localement le travail en chaleur.
- Vaso-constriction : Les vaisseaux sanguins se contractent et le débit de sang dans les membres diminue. Ce mécanisme permet de limiter les pertes de chaleur par les extrémités et de préserver les organes vitaux, en particulier le cerveau. Ceci explique que les victimes du froid, les alpinistes par exemple, ont les doigts et les orteils gelés.

Lorsque l'hypothermie atteint 33 °C environ, la personne perd connaissance et à 25°C l'issue est fatale.

A l'inverse, en cas d'augmentation de température, il se produit :

- Vaso-dilatation : Les vaisseaux sanguins se dilatent et le débit de sang augmente jusqu'à 30 fois dans les mains et les pieds. La peau devient plus chaude et le corps humain transmet davantage de chaleur à son environnement.
- Transpiration : Les glandes sudoripares sécrètent davantage de sueur à la surface de la peau, jusqu'à 3 litres d'eau par jour. Cette eau, si elle parvient à s'évaporer, emporte une grande quantité de chaleur. Une personne acclimatée³ peut perdre un kilogramme d'eau par heure, ce qui représente une puissance de 700 W. Au-delà, la sueur ruisselle sur la peau sans s'évaporer.
- Respiration accélérée : L'augmentation du débit d'air aspiré et expiré accroît la quantité de chaleur directement évacuée de l'intérieur du corps humain. Ce principe est nommé halètement chez les animaux, comme le chien par exemple.

Si l'hyperthermie atteint 42 à 43 °C, elle engendre le décès de la personne.

1.2 Échanges thermiques entre le corps humain et son environnement

Dans une ambiance modérée, une personne perd sa chaleur selon 5 modes de transmission.

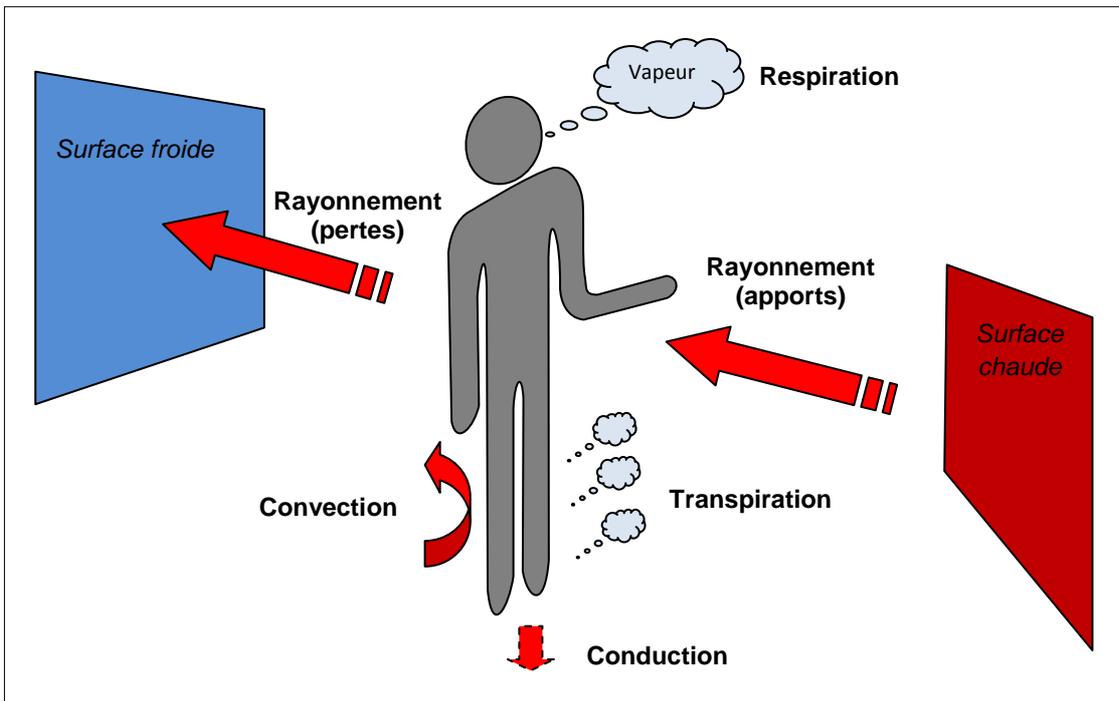


Figure 2 : Modes de transmission de chaleur entre le corps humain et son environnement

1.2.1 Respiration

La circulation d'air ambiant à l'intérieur de nos poumons représente une perte de chaleur.

On peut distinguer :

- La chaleur sensible : l'air expiré est plus chaud que l'air inspiré,
- La chaleur latente : l'air expiré contient plus de vapeur d'eau que l'air inspiré.

Cette perte de chaleur est directement proportionnelle au débit d'air respiré, lui-même proportionnel au métabolisme. Avec une activité normale en intérieur, elle est faible, de l'ordre de 3 à 10 W.

1.2.2 Transpiration

La sueur traverse la peau et s'évapore à sa surface.

On peut distinguer :

- **La diffusion** : perte non contrôlée d'humidité du corps humain, due à la porosité de la peau. Elle dépend de la température de la peau et de la quantité de vapeur contenue dans l'air ambiant. La diffusion est plus importante en hiver qu'en été, car l'air ambiant est

généralement plus sec. Néanmoins, la puissance correspondante varie peu et reste de l'ordre de 18 W.

- **La sudation** : perte supplémentaire d'humidité dans le but de refroidir le corps humain. Ce mécanisme se déclenche si l'activité est importante ou l'ambiance excessivement chaude. La sudation est très efficace tant que la sueur s'évapore et ne ruisselle pas. L'augmentation de la vitesse de l'air permet en général d'augmenter l'évaporation à la surface de la peau. Mais si l'air ambiant est saturé en humidité, comme dans un sauna, la sueur ne peut s'évaporer et ne produit donc aucun refroidissement.

1.2.3 Conduction

La chaleur quitte le corps humain par ses parties en contact avec des surfaces froides. Une personne debout n'a que ses pieds en contact avec le sol, ce qui représente une surface très petite.

Une personne assise dans un fauteuil ou couchée sur un lit, perd très peu de chaleur par conduction, car ces meubles diffusent très peu la chaleur. Cela revient en fait, à un habillement supplémentaire.

1.2.4 Convection

L'air ambiant au contact de la peau ou des vêtements se réchauffe et emporte de la chaleur. La quantité échangée dépend directement de la vitesse relative de l'air par rapport au corps humain. Une personne qui se déplace dans un air calme est une situation équivalente à une personne immobile dans un air en mouvement. Si la personne se déplace en même temps que l'air, il est nécessaire de connaître leurs directions respectives.

Si la vitesse relative est nulle, la convection est naturelle. L'air au contact de la surface chaude, s'échauffe à son tour, se dilate, devient plus léger que l'air ambiant et monte naturellement.

Dans le cas contraire, la convection est forcée. La quantité de chaleur transmise à l'air est alors très supérieure et proportionnelle à l'écart de température entre la peau (ou le vêtement) et l'air ambiant.

1.2.5 Rayonnement

Le rayonnement se produit de la surface de la peau ou des vêtements vers les surfaces froides environnantes. Un échange inverse et simultané peut se produire s'il existe une surface à une température supérieure à la peau ou aux vêtements.

On voit ici que le rayonnement n'est pas influencé par l'air situé entre ces deux surfaces.

La quantité de chaleur transmise par rayonnement est pratiquement proportionnelle à l'écart entre les températures des deux surfaces.

1.2.6 Incidence de l'habillement

L'habillement, en ajoutant une isolation thermique autour du corps humain, diminue la température de surface en contact avec l'ambiance. Il en résulte des puissances échangées par convection et par rayonnement plus faibles, même si la surface extérieure a été augmentée. Les vêtements courants sont perméables à la vapeur d'eau et restent sans incidence sur la transpiration.

Les tenues vestimentaires sont évaluées par leur résistance thermique, c'est à leur aptitude à s'opposer au passage de la chaleur. On prend pour référence la tenue d'intérieur d'hiver⁴.

Tenue vestimentaire	Niveau d'habillement (nombre de fois l'isolation de référence)	Résistance thermique ⁵ [m ² .°C/W]
Nu	0	0
Short	0,1	0,016
Tenue tropicale : <i>Tee-shirt, short, sandales</i>	0,3	0,047
Tenue d'été : <i>Chemise à manches courtes, pantalon léger, socquette, chaussures</i>	0,5	0,078
Tenue de travail légère : <i>Sous-vêtements, chemises à manches longues, pantalon, chaussettes, chaussures</i>	0,7	0,124
Tenue d'intérieure d'hiver : <i>Sous-vêtements, chemises à manches longues, pull-over, pantalon, chaussettes, chaussures</i>	1	0,155
Tenue de ville européenne, traditionnelle : <i>Sous-vêtements, chemises à manches longues, complet avec pantalon, gilet et veste, imperméable, chaussettes épaisses, grosses chaussures</i>	1,5	0,233
Tenue chaude d'extérieur : <i>Sous-vêtements, chemises à manches longues, pantalon épais, pull-over, manteau, chaussettes épaisses, grosses chaussures, bonnet, gant, écharpe</i>	2	0,310

1.3 Équilibre thermique du corps humain

La première condition indispensable pour procurer le confort thermique à une personne est d'équilibrer son bilan énergétique. La puissance calorifique produite par le métabolisme doit être égale à la puissance dissipée dans l'environnement par les cinq moyens d'échange que nous venons de voir.

1.3.1 Facteurs d'influence

Les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement sont conditionnés par quatre grandeurs physiques, classées par ordre décroissant d'influence :

- **La température ambiante**

Ce terme désigne la température de l'air mesurée à l'abri de tout rayonnement, à une hauteur d'environ 1,50 mètre du sol.

- **La température radiante moyenne**

C'est la moyenne des températures de surface des parois qui entourent la personne⁶.

- **La vitesse relative de l'air**

C'est la vitesse de déplacement de l'air sur le corps de la personne⁷.

- **L'hygrométrie de l'air** (ou humidité relative)

C'est le rapport entre la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air et la masse maximale qu'il peut contenir à la même température (air saturé⁸). Par exemple, si l'hygrométrie est égale à 50%, cela signifie que l'air contient moitié moins d'humidité que l'air saturé à la même température. L'hygrométrie est facilement mesurable.

1.3.2 Température résultante

Pour simplifier l'étude quantitative des échanges par convection et rayonnement, on définit la **température résultante** comme la moyenne de la température de l'air et de la température radiante moyenne. On imagine que l'air et les parois ont une température identique telle que la puissance globale échangée par convection et rayonnement est identique.

$$\text{Température résultante} \approx \frac{\text{Température ambiante} + \text{Température radiante moyenne}}{2}$$

Dans l'exemple présenté ci-dessous, les températures ambiante et radiante moyenne ont pour valeurs respectives, 22 et 16 °C. La température résultante est donc égale à :

$$\text{Température résultante} = (22 + 16) / 2 = 38 / 2 = 19 \text{ °C}$$

Lorsque la température de l'air ambiant passe de 22 à 19 °C, la chaleur échangée par convection augmente. A l'inverse, lorsque la température radiante moyenne passe de 16 à 19 °C, la chaleur échangée par rayonnement diminue.

Ces deux variations se compensent mutuellement de façon que la somme des deux quantités de chaleur échangée reste constante.

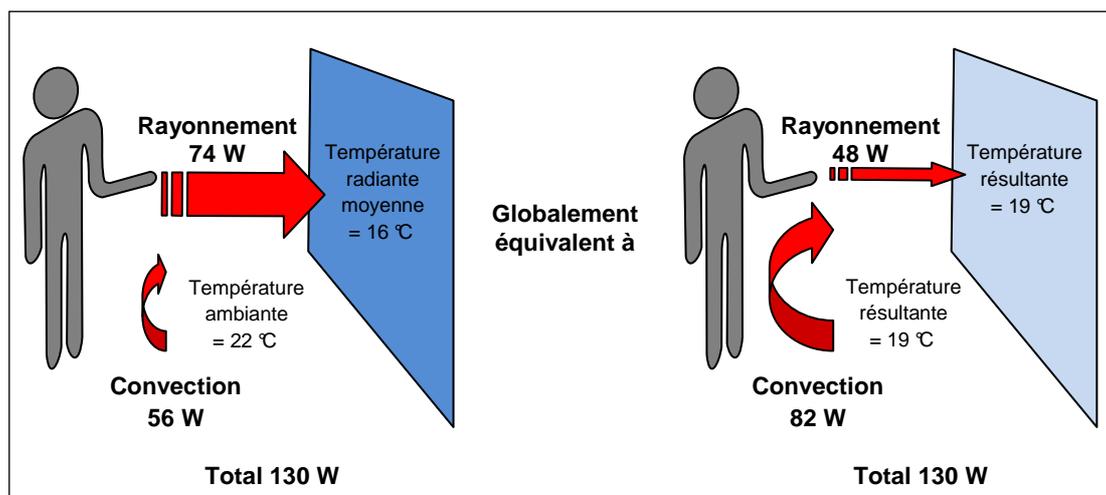


Figure 3 : Notion de température résultante

1.3.3 Température résultante de confort

La température résultante qui assure l'équilibre thermique des personnes dépend principalement de leur niveau d'activité et d'habillement. Sur le graphique ci-dessous, les courbes rouges représentent les températures résultantes de confort, tandis que les zones alternativement blanches et bleues indiquent la tolérance autour de cette valeur optimale. On remarquera que la tolérance sur le climat est d'autant plus grande que le niveau d'activité et l'habillement sont importants.

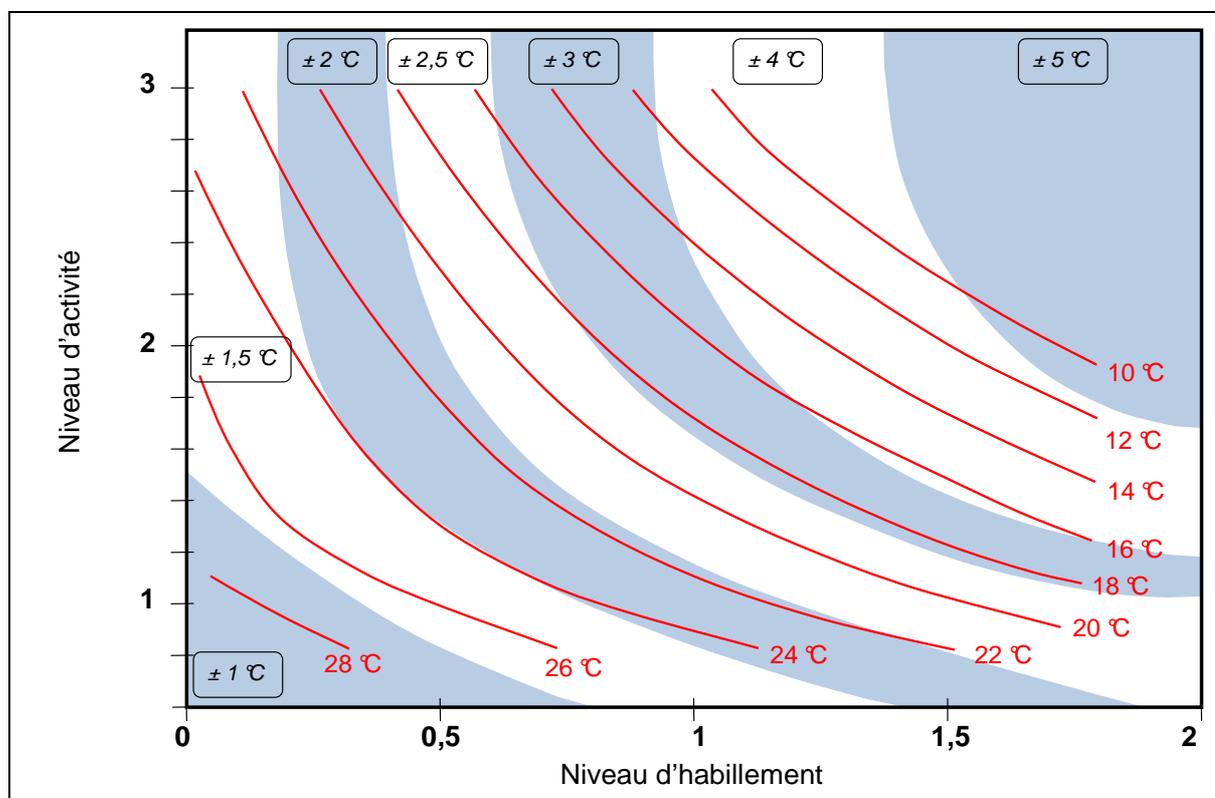
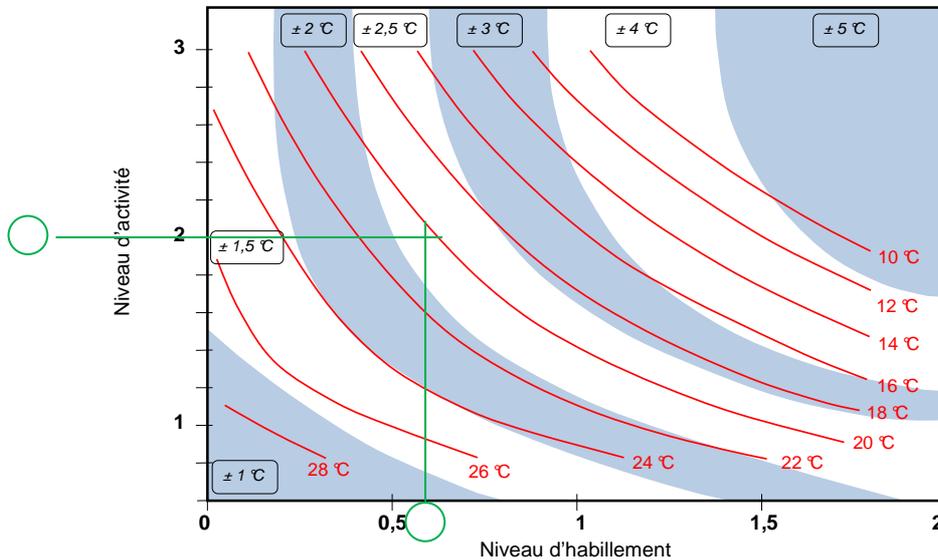


Figure 4 : Température résultante de confort (avec air calme et hygrométrie moyenne)

Exemple 1 : Déterminer la plage de température résultante qui satisfait le confort d'une personne debout avec une activité moyenne et une tenue d'intérieur pour l'hiver.

Niveau d'activité = 2

Niveau d'habillement = 1

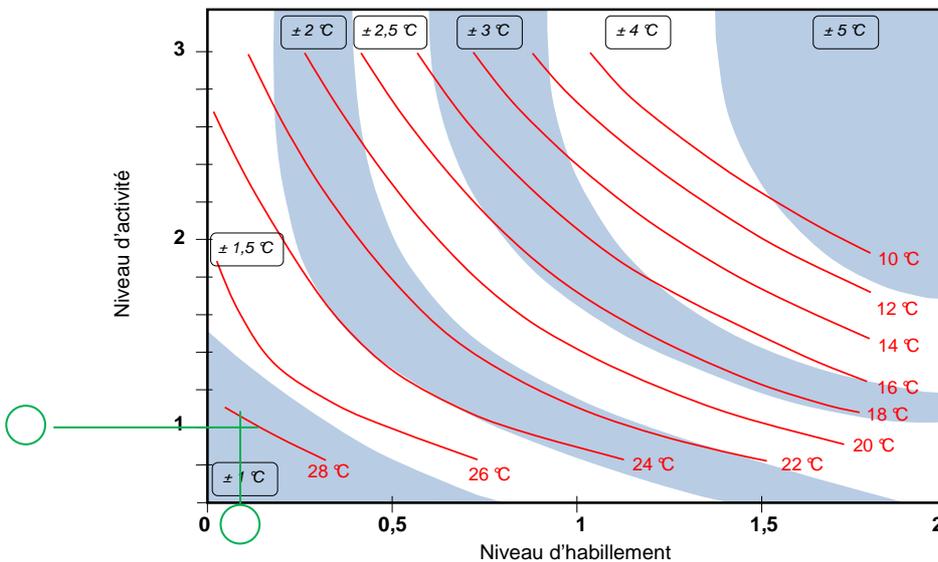


Température résultante de confort = $16,5 \pm 3$ °C (entre 13,5 et 19,5 °C)

Exemple 2 : Déterminer la plage de température résultante qui satisfait le confort d'une personne assise au repos et une tenue d'été.

Niveau d'activité = 1

Niveau d'habillement = 0,5



Température résultante de confort = $26 \pm 1,5$ °C (entre 24,5 et 27,5 °C)

1.4 Autres critères à satisfaire

L'équilibre thermique de la personne est une condition nécessaire mais pas suffisante pour garantir son confort. On doit aussi satisfaire à quatre autres critères.

1.4.1 Vitesse relative de l'air

Lorsque la température ambiante est excessive, l'usage de ventilateurs est très répandu. Ces appareils ne refroidissent pas l'air (en fait, ils le réchauffent un peu) mais le mettent en mouvement. Quand l'air circule rapidement autour du corps humain, il emporte beaucoup de chaleur par convection et aussi par évaporation, ce qui donne la sensation que l'air est plus froid.

Mais une vitesse de l'air excessive, constitue un désagrément pour les personnes qui se plaignent alors, de ressentir des « courants d'air ». Elle est aussi un obstacle à beaucoup d'activités : dans un bureau, les papiers s'envolent.

Un écoulement de l'air très régulier (flux laminaire⁹) est mieux toléré qu'un écoulement turbulent. Dans la zone où séjournent les personnes, **la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 0,4 m/s.**

1.4.2 Hygrométrie (ou humidité relative)

De préférence, **l'hygrométrie doit rester comprise dans l'intervalle 30 - 70 %.**

- Si l'hygrométrie est inférieure à 30 %, l'air est trop sec. Ceci provoque le dessèchement de la peau et des muqueuses, ce qui entraîne gênes et risques sanitaires :
 - une peau trop sèche devient rugueuse et irritée,
 - les porteurs de lentilles de contact se plaignent du manque de lubrification de leurs lentilles,
 - le nez filtre moins bien les particules contenues dans l'air qui pénètrent ainsi dans l'appareil respiratoire,
 - la gorge sèche est douloureuse et sujette aux attaques microbiennes...
- Si l'hygrométrie est supérieure à 70 %, l'air est trop humide. Les sujets expriment une sensation d'étouffement. La sueur s'évapore mal à la surface de la peau et peut ruisseler. Une humidité excessive favorise le développement de bactéries, moisissures, champignons, acariens...

Pour maintenir l'hygrométrie dans cet intervalle, il est souvent nécessaire d'humidifier l'air en hiver et de le déshumidifier en été.

1.4.3 Ecart de température tête – pieds

L'homogénéité de température de l'air ambiant est aussi un critère de confort. La température des pieds est mesurée à 10 cm de hauteur, celle de la tête à 1,10 m ou 1,70 m selon de la personne est assise ou debout. L'écart entre ces deux températures devrait rester inférieur à 2 °C.

Avec les systèmes de chauffage échangeant leur chaleur par convection naturelle, l'air chaud plus léger que l'air froid a tendance à s'élever et à s'accumuler au plafond.

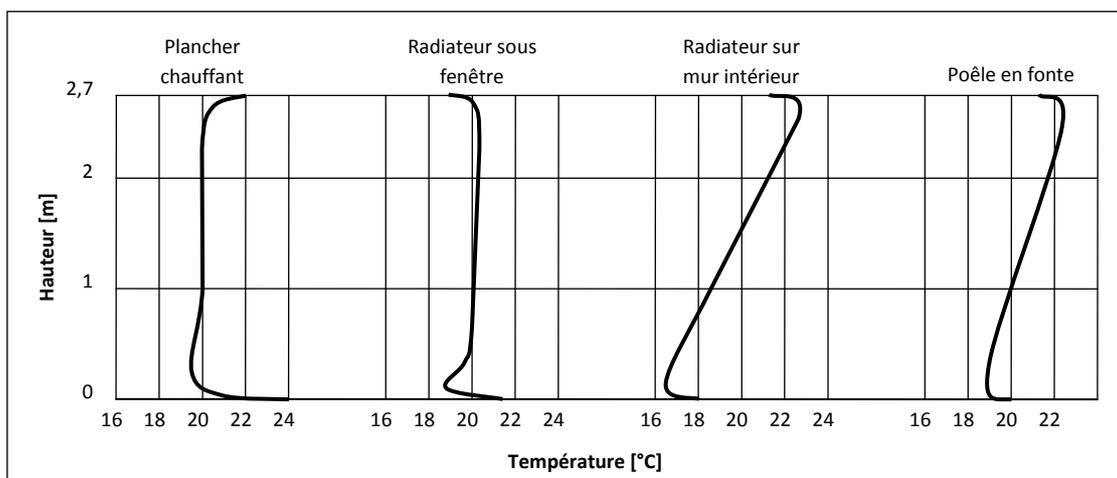


Figure 5 : Exemples de profil de température vertical avec différents moyens de chauffage

1.4.4 Rayonnement asymétrique

Une personne entourée de surfaces chaude et froide ressent la différence de rayonnement de ces surfaces. La partie de son corps exposée au rayonnement de la surface chaude, le capte et se réchauffe. A l'inverse, l'autre partie de son corps rayonne vers la surface froide et se refroidit. Ceci impose à l'organisme, un transfert de chaleur interne, perçu comme désagréable.

Le graphique ci-dessous montre comment l'écart de température des surfaces est ressenti par un groupe de personnes.

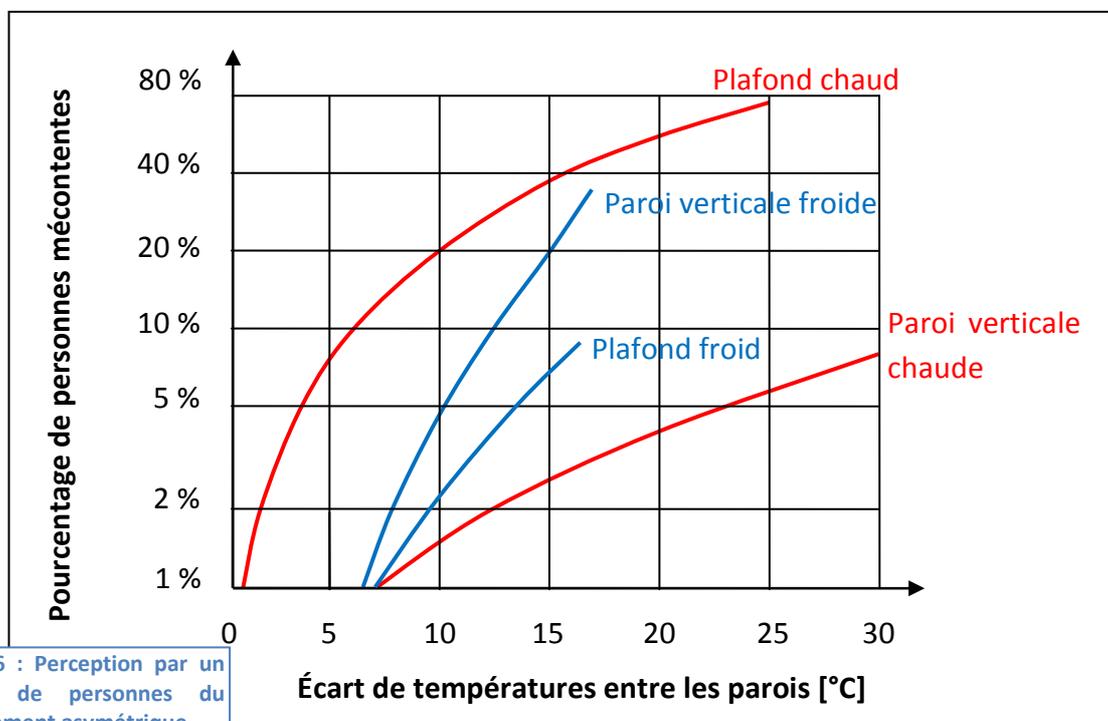


Figure 6 : Perception par un groupe de personnes du rayonnement asymétrique

¹ Métabolisme : Ensemble des processus complexes et incessants de transformation de matière et d'énergie par la cellule ou l'organisme, au cours des phénomènes d'édification et de dégradation organiques (anabolisme et catabolisme) [Source : Larousse].

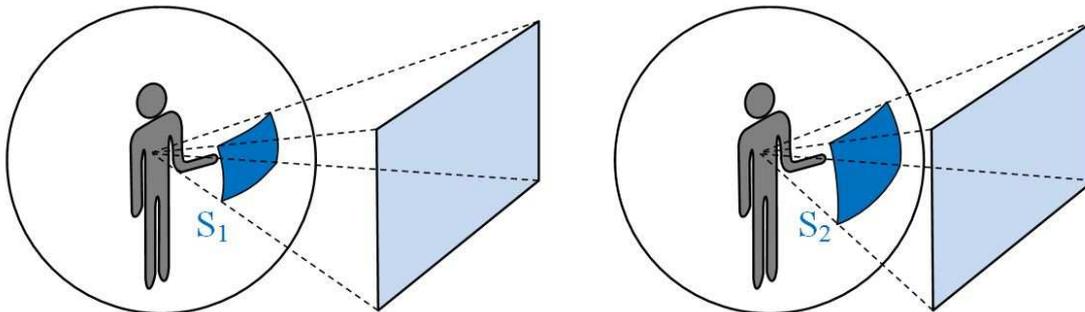
² Pour quantifier le niveau d'activité d'une personne, les spécialistes utilisent comme unité, le met (de métabolisme). 1 met est égal à 1 fois le métabolisme basal (assis, au repos). Une personne ayant une activité de 3 met, produit 3 fois plus d'énergie que lorsqu'elle est assise au repos.

³ Une personne est acclimatée quand son organisme s'est adapté à l'ambiance. Cela demande quelques minutes dans une ambiance tempérée, jusqu'à plusieurs jours avec un climat extrême, très chaud ou très froid.

⁴ Pour quantifier l'isolation thermique apportée par les vêtements, les spécialistes utilisent comme unité le clo (de *clothing*). 1 clo désigne l'habillement intérieur d'hiver et correspond à une résistance thermique de 0,155 [m².°C/W].

⁵ La résistance thermique caractérise l'isolation thermique, ici apportée par le vêtement. C'est l'inverse du coefficient de transmission thermique U en [W/m².°C] qui indique la puissance traversant le vêtement, sur 1 m² de surface et pour 1°C d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

⁶ En toute rigueur, il faut pondérer chaque température de surface par l'angle solide sous lequel la personne voit la surface. Par exemple, les températures de surface sont de 10 °C pour la fenêtre et de 20 °C pour toutes les autres parois. Pour calculer la température moyenne résultante, on peut imaginer que l'observateur est le centre d'une sphère. Tous les rayons de la sphère passant par le contour de la fenêtre, dessinent sur la sphère la surface S₁.



On procède de la même façon pour chaque surface et on calcule la température radiante moyenne par la formule : $\theta_{rm} = \frac{\sum \theta_i \cdot S_i}{\sum S_i} = \frac{\sum \theta_i \cdot S_i}{S_{sphère}} = \sum \theta_i \cdot \frac{S_i}{S_{sphère}}$

Si dans le cas présent la surface S₁ représente 5% de la surface de la sphère, on a simplement : $\theta_{rm} = 10 \times 0,05 + 20 \times 0,95 = 0,5 + 19 = 19,5 \text{ °C}$

Lorsque la personne s'approche de la fenêtre, elle la voit sous un angle solide plus grand. La surface sur la sphère devient S₂, supérieure à S₁. Si S₂ représente 10% de la surface de la sphère, on a maintenant : $\theta_{rm} = 10 \times 0,10 + 20 \times 0,90 = 1 + 18 = 19 \text{ °C}$

Si la personne se tient approximativement au centre d'une pièce proche d'un cube, il est possible d'estimer la température radiante moyenne comme la moyenne des températures de surface θ_i , pondérée par les surfaces des parois Sp_i : $\theta_{rm} = \frac{\sum \theta_i \cdot Sp_i}{\sum Sp_i}$

⁷ Plusieurs cas sont envisageables :

- la personne est immobile : la vitesse relative est la vitesse de l'air,
- la personne se déplace dans un air immobile : la vitesse relative est la vitesse de la personne,
- la personne se déplace dans le même sens que l'air : la vitesse relative est la différence entre la vitesse de la personne et celle de l'air

-
- la personne se déplace dans le sens opposé au déplacement de l'air : la vitesse est la somme de la vitesse de la personne et celle de l'air.

⁸ L'air est saturé lorsqu'une partie de l'humidité qu'il contient est sous forme liquide. Ces gouttes d'eau en suspension sont alors visibles et on parle de brume ou de bouillard.

⁹ Le flux laminaire désigne un écoulement de fluide dont les particules suivent des trajectoires parallèles, approximativement à la même vitesse.