

Ambiance et confort thermique

« L'existence des phénomènes extérieurs ne peut être immédiatement perçue, mais seulement conclue comme la cause de perceptions données »¹.

Emmanuel Kant

Introduction :

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. Celui-ci dépend de plusieurs paramètres à savoir les facteurs d'ordre individuel et les facteurs liés à l'environnement. L'étude du confort thermique est très importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance, car le monde d'aujourd'hui souffre d'une crise énergétique.

Selon Lavigne.P, le confort thermique est une sensation qui fait intervenir des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, donc cela explique la complexité de ce thème car il dépend du côté subjectif des usagers qui place la perception de chaque individu au cœur de l'analyse.

On a consacré ce chapitre à établir un état de l'art sur tout ce qui concerne les notions fondamentales sur l'ambiance et le confort thermique. En premier lieu on a intéressé de définir le concept "ambiance" et ses différents typologies. Par la suite, nous aborderons les paramètres et les différents aspects du confort thermique. Enfin, on a cité quelques stratégies d'évaluation du confort thermique.

¹ Emmanuel Kant, d'après CD-ROM 12 dictionnaires indispensables

II .1- L'ambiance thermique :

II .1.1- Généralités sur la notion d'ambiance :

Étymologiquement le terme ambiance est dérivé du latin *ambiens*, participe présent du verbe : ambire (latin) : entourer, environner².

D'après le dictionnaire encyclopédie 2000 l'ambiance est « *Atmosphère qui existe autour de qqn, dans un lieu, dans une réunion : une bonne ambiance (syn. climat)* »³

Et selon le Dictionnaire Larousse : « *Atmosphère qui existe autour d'une personne ; réaction d'ensemble d'une assemblée* »⁴

Selon Hégron. G, Torgue. H : « La notion d'ambiance nous permet d'échapper précisément à une trop stricte opposition sujet/objet, c'est-à-dire d'éviter la séparation entre la perception du milieu par un usager et l'objet perçu. Elle articule la connaissance des phénomènes physiques en présence, leurs interactions avec la forme construite, les usages des espaces architecturaux et urbains, la perception de l'usager et ses différentes représentations »⁵

Selon Pascal.J, le mot ambiance peut avoir dix synonymes, qui sont : atmosphère, aura, climat, compagnie, décor, entourage, environnement, influence, milieu, temps.

Il se trouve qu'il ya des termes comme mieux centrés sur l'ambiance : milieu, atmosphère, environnement. Et d'autres périphériques : influence, temps, compagnie. Les trois premières notions sont plus compréhensibles dans le langage courant, ils correspondent respectivement aux modalités spatiales, temporelles, anthropologiques et physiques.

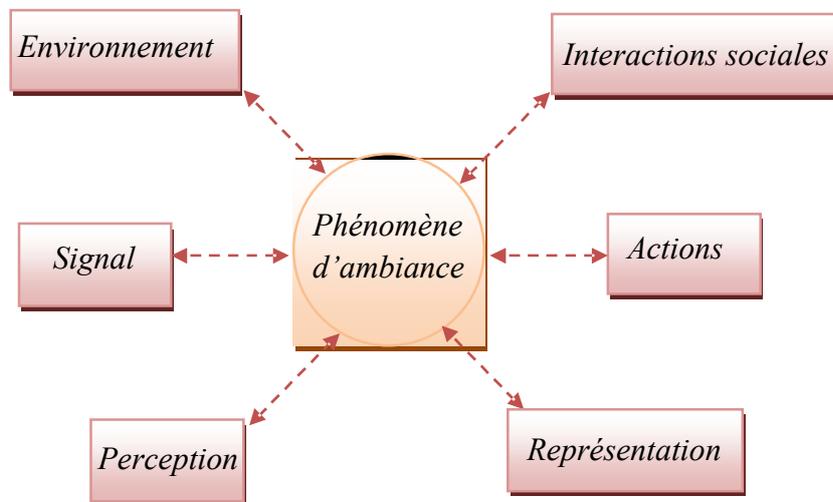


Figure-II.1 : Modalités d'un phénomène d'ambiance in situ.

Source : Pascal Joanne, thèse de doctorat, 2003, P : 24

² www.wikipédia.org

³ Dictionnaire encyclopédie 2000

⁴ Dictionnaire Larousse

⁵ http://latts.cnrs.fr/site/tele/rep1/HegronTorgueAmbiances_PIRVE.pdf

Aussi, Jean-François Augoyard propose des éléments de définition formelle du concept ambiance où il a rassemblé un ensemble d'attributs déterminant l'essence de ce concept, qui sont d'ordre : physique, psycho-sociologie, architectural et interdisciplinaire :

- ✦ Physique : les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables.
- ✦ Psycho-sociologie : ces signaux interagissent avec :
 - La perception, les émotions et l'action des sujets
 - Les représentations sociales et culturelles
- ✦ Architecture : ces phénomènes composent une organisation spatiale construite (construction architectonique et/ou construction perceptive).
- ✦ Interdisciplinarité : le complexe (signaux/percepts/représentations) est exprimable (possibilité d'accéder à la représentation experte et/ou usagère).

D'une manière générale, l'ambiance relie le domaine architectural et urbanistique aux sciences pour l'ingénieur et les sciences humaines et sociales, donc, elle est interdisciplinaire

L'ambiance architecturale et urbaine : Une ambiance architecturale et urbaine est l'ensemble des phénomènes physiques qui engendrent et modifient la perception sensible de l'environnement construit des usagers « *Nous appréhendons les ambiances à travers plusieurs dimensions Cela va de la caractérisation des paramètres physiques à la dimension esthétique en passant par la dimension psychologique, émotionnelle* »⁶.

II .1.2- Les éléments constitutifs d'une ambiance :

Une ambiance est née dans un environnement construit, chez les usagers sous des conditions physiques. Selon Gérard Hégron : « *La mise en relation des descriptions morphologiques et physiques d'un environnement architectural ou urbain avec les représentations cognitives des usagers explicite les spécificités d'ambiance d'un lieu* »⁷, voir fig II.2

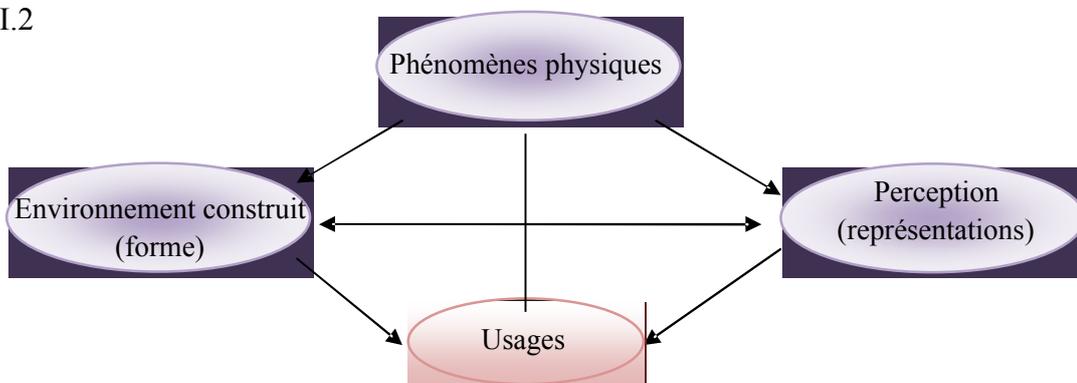


Figure-II.2 : Les éléments constitutifs d'une ambiance
Source : Gérard Hégron, Henry Torgue, 2007, Réadapté par l'auteur

⁶ http://latts.cnrs.fr/site/tele/rep1/HegronTorgueAmbiances_PIRVE.pdf

⁷ www2.cnrs.fr > ... > La physique domestiquée

II .1.2.1- Les objets : les objets d'une ambiance représentent l'environnement physique entouré par l'homme et qui peut être un environnement construit (par exemple les bâtiments), un environnement naturel (végétation, plans d'eau, ...).

II .1.2.2- Les sujets : se sont les usagers qui pratiquent ou fréquentent les environnements physiques (architectural et urbain) et qui perçoivent l'espace habité à travers des représentations cognitives

II .1.2.3- L'interface : représente l'ensemble des réactions de l'homme dans une ambiance bien déterminée, et qui sont les sensations : physiologique, psychologique/émotionnels et esthétique. Par exemple si on s'intéresse à l'interface psychophysique, il s'agit de savoir les réactions d'un stimulus sur la sensation correspondante perçue par le sujet.

II .1.3- Les échelles d'une ambiance :

II .1.3.1- L'échelle spatiale :

L'ambiance émerge et prend forme dans des volumes, dans des surfaces, dans des dispositifs, à travers des matériaux qui la confortent. Et selon Hégron.G, Torgue.H :

« De la micro-échelle, à savoir l'espace immédiat qui environne un usager (une rue, une place, un bâtiment, ...) à la macro-échelle (le tissu urbain), d'autres niveaux d'échelles intermédiaires peuvent être considérés comme l'îlot et le quartier urbain »⁸.

II .1.3.2- L'échelle temporelle :

La trame "temporelle" permettant de rendre compte les variations des conditions de l'environnement, une ambiance est relative au facteur temps, car elle change avec les heures de chaque jour, par exemple, on trouve une ambiance thermique globale si on s'intéresse à l'échelle temporelle macro (année), elle peut être plus réduite selon : mois, semaine, jour, heure... tout simplement, elle est évolutive selon les différentes temporalités. (Voir photos-II.1)



8h30 (le 31/03/2008)



18h10h (le 31/03/2008)

Photos II.1: Différents types d'ambiances sous différentes conditions temporelles (Entrée du Campus universitaire-Biskra)

Source : Auteur, 2008

⁸ http://latts.cnrs.fr/site/tele/rep1/HegronTorgueAmbiances_PIRVE.pdf

II .1.3.3- L'échelle climatique :

Une ambiance est conditionnée par les facteurs climatiques, à savoir : la température de l'air, l'humidité, le vent... par exemple sous une ambiance thermique très chaude les usagers de tel espace cherche de l'ombre et d'avoir plus de froid, leurs comportement peuvent être sous plusieurs formes physiologique, comportementales ou bien technique et d'une manière consciente ou inconsciente.

Si l'occupant se trouve dans une ambiance froide, leur sensation sera complètement inversée par rapport à la première situation. Il va chercher un climat plus chaud à travers les différentes réactions citées-ci dessus. Dans des conditions de neutralité l'homme ne veut ni chaud ni froid. Mais tout cela reste relatif à d'autres paramètres comme : l'âge, santé, sexe...

II .1.3-L'ambiance thermique :

L'exposition au froid ou à la chaleur peut être à l'origine de troubles chez l'individu. En effet la température de l'homme doit demeurer constante (homéothermie) quelle que soit son ambiance thermique. Cette dernière fait appel à plusieurs facteurs, on peut citer: les facteurs énergétiques (le rayonnement solaire, lumière), les facteurs hydrauliques (la précipitation) et les facteurs mécaniques (mouvement de l'air)

II .1.4- Les différentes notions d'ambiance thermique :

Dans les locaux de travail et de vie, on peut avoir trois types d'ambiances thermiques : Ambiance thermique neutre, froide ou bien chaude.

II .1.4.1- Ambiance thermique neutre :

Le flux de chaleur est évacué par la convection et le rayonnement, à l'exclusion de toute vapeur sudorale. Selon Millanoye M , les valeurs d'ambiances thermiques neutres sont :

-Température sèche :

Travail sédentaire : 20° - 21°C

Travail physique modéré : 17° - 18°C

Travail physique intense : 15°C

- Pourcentage d'humidité : 50 à 60 %

Si la température s'élève ou le travail musculaire augmente, diminuer le pourcentage d'humidité.

- Vitesse de l'air : Pour un travail sédentaire : 0,1 à 0,25 m/s

Pour un travail physique : jusqu'à 10 m/s, cette vitesse dépendant des autres paramètres du bilan thermique.

II .1.4.2- Ambiance thermique froide : l'évaluation de l'astreinte physiologique en ambiance froide repose, pour l'essentiel, sur l'évaluation par le sujet lui-même de l'inconfort lié à la température des surfaces cutanées ($T_{\text{froid}} > 17^{\circ}\text{C}$).

Les flux convectifs et radiatifs font à eux seuls perdre plus de chaleur que n'en produit le métabolisme énergétique.

L'organisme perd de la chaleur, ce qui a pour conséquence un refroidissement ou une mise en jeu des mécanismes de lutte contre le froid.

II .1.4.3- Ambiance thermique chaude :

Lorsque les flux convectifs et radiatifs sont insuffisants pour évacuer le métabolisme énergétique, l'organisme met en route l'évaporation de la sueur.

Pour ces deux dernières ambiances, tant que les mécanismes physiologiques de lutte sont suffisants pour assurer un nouvel équilibre thermique, nous parlerons d'ambiance tolérable.

Lorsque ces mécanismes sont saturés, l'équilibre ne peut être plus assuré, c'est pourquoi il est indispensable de déterminer des durées limites d'exposition.

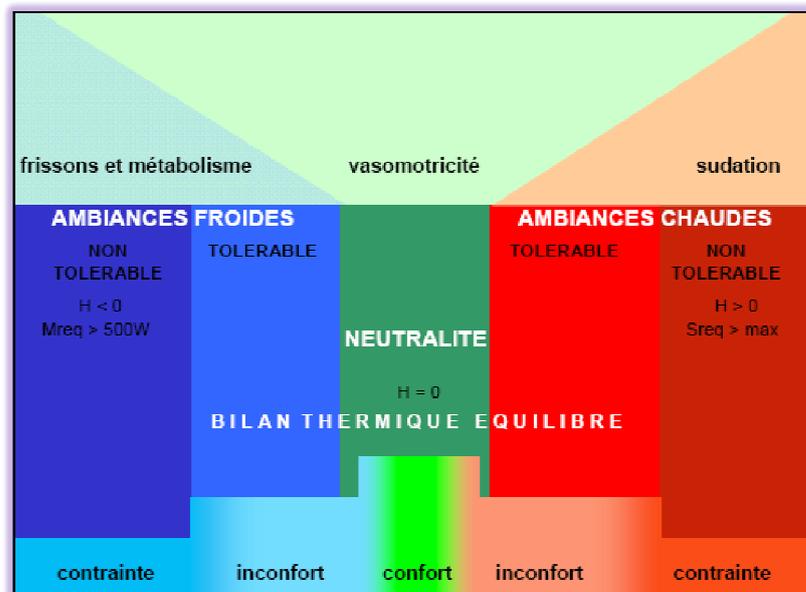


Figure-II. 3: ambiance thermique : sensations et réactions

Source : www.ergonomie.chups.jussieu.fr

II .1.5- Ambiance thermique acceptable pour le confort :

Le confort thermique est défini comme la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique. L'insatisfaction peut être causée par un inconfort "tiède" ou "frais" pour le corps dans son ensemble exprimé par les indices PMV et PPD ; ou par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps.

Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et les chevilles, à un sol trop chaud ou trop froid ou à une asymétrie trop grande de rayonnement thermique, mais aussi à un métabolisme trop élevé ou à un vêtement lourd.

En raison des différences d'un individu à l'autre, il est impossible de prescrire une ambiance thermique qui puisse satisfaire chacun ; c'est pourquoi il faut prévoir des ambiances acceptables par le plus grand nombre d'occupants.

La diversité des ambiances, l'identification d'une ambiance, la variabilité des conditions environnementales, la capacité de s'adapter...autant de paramètres à maîtriser à travers le microclimat.

II. 2. Le confort thermique :

Le confort thermique peut être défini comme :

1^{ème}/ « Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement »

2^{ème}/ « A été défini comme étant la condition dans laquelle aucune contrainte significative n'est imposée aux mécanismes thermorégulateurs du corps humain. Permet l'obtention de conditions optimales pour tous les systèmes fonctionnels de l'organisme ainsi qu'un haut niveau de capacité de travail »⁹.

3^{ème}/ « la condition d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique »¹⁰.

4^{ème}/ D'après la norme ISO 7730, « il y a situation de confort thermique si deux conditions sont satisfaites : Le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient pas trop sollicités ».

Confort hygrothermique :

Selon la démarche HQE, le Confort hygrothermique représente le 8^e cible sous la notion de « *Ni chaud ni froid, ni humide ni sec* ». En hiver comme en été, le confort hygrothermique souhaité par l'occupant consiste généralement à ne vouloir avoir ni chaud ni froid (en fonction des conditions climatiques, des caractéristiques de l'utilisateur, de l'homogénéité thermique...). Le confort hygrothermique permet d'atténuer les réactions physiologiques thermorégulatrices (sudations, frissonnements) et les sensations psychologiques de chaud ou de froid.

⁹ De Herde André, Liébard Alain, *Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Editions du Moniteur, Paris, France, 2005. P : 27

¹⁰ Selon le standard ASHRAE 55-74

II.3- Les paramètres du confort thermique :

Les paramètres de confort thermique dans le bâtiment sont :

II.3.1- La température de l'air :

Il intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'homme au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires.

Généralement, pour évaluer le confort thermique dans le bâtiment, la température ambiante de l'air est couplée par d'autres paramètres climatiques tels que : la vitesse d'air, l'humidité..., prendre tout seule peut induire en erreur et ne donne pas une idée précise sur le confort thermique. La température ambiante altère la sensation de chaleur, lorsque le niveau de l'humidité est élevé et la vitesse de l'air faible, la sensation d'humidité de la peau augmente également avec la température ambiante.

Mais sous des conditions, faible humidité et une vitesse de l'air élevée, la peau peut rester sèche même à des températures fortes (malgré l'augmentation de la sueur).

La température de l'air ambiant ou température sèche est mesurée par un thermomètre au bulbe sec (thermomètre doit être aplati pour éviter l'influence du rayonnement), l'intervalle de confort va généralement de 18 à 25 C°.

II.3.2-La température des parois (Tp) : moins de 4° de différence avec l'air ambiant :

Est utilisée dans le calcul des échanges radiatifs des grandes longueurs d'onde entre l'individu et l'environnement.

La température des parois couplée à la température de l'air donne une idée sur le confort ressentie (appelée aussi température résultante sèche ou température opérative), cette dernière se détermine selon l'équation suivante : $T_{rs} = (T_a + T_p)/2$ Eq.1

II.3.3- L'humidité relative de l'air (HR) :

L'humidité relative par définition est : « *le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette température* »¹¹.

L'humidité détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur (relative à la différence entre les tensions de vapeur d'eau de l'air ambiant et celle de la peau). Dans le cas où le corps humain n'atteint pas à évaporer toute la sueur, une couche liquide se forme sur la peau (peau humidifiée).

Les réactions physiologiques et sensorielles du à l'humidité sont relevés lorsque la vitesse de l'air augmente. Entre 30% et 70% elle pèse peu sur la sensation du confort thermique.

¹¹ De Herde André, Liébard Alain, Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Éditions du Moniteur, Paris, France, 2005. P : 16

II.3.4- La vitesse de l'air :

La vitesse de l'air influe sur les échanges convectifs et évaporatifs, à l'intérieur des bâtiments ces vitesses demeurent limitées et ne dépassent pas 0,20m/s.

Toutefois elle est responsable à l'apparition de gêne chez l'occupant, lié à la présence de courants d'air froids ou chauds.

II.3.5- La tenue vestimentaire :

Elle représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Les vêtements constituent une deuxième barrière thermique après la peau, ils influencent sur les échanges de chaleur convective et radiative,

"A des températures de l'air inférieures à 35°C, l'effet est toujours de réduire la perte de chaleur « sèche » du corps et ainsi de produire un effet d'échauffement. A des températures de l'air supérieures à 35°C, les effets des vêtements sont plus complexes. D'un côté ils réduisent le gain de chaleur « sèche » en provenance de l'ambiance mais d'un autre côté, ils augmentent l'humidité et réduisent la vitesse de l'air en contact avec la peau, ce qui se traduit par une diminution du refroidissement résultant de l'évaporation de la sueur"¹².

Mais parfois une partie de l'évaporation se produit par les vêtements par l'effet de réchauffement. Généralement l'effet des vêtements sur la thermique du corps humain est lié à des paramètres internes et d'autres externes : - Les paramètres internes (liés aux vêtements) : la couleur et la perméabilité à l'air des vêtements.

-Les paramètres externes : l'humidité, vitesse de l'air, métabolisme

L'unité de la résistance thermique est le "clo", en terme physique le clo est équivalent à 0,18 °C.h.m²/kcal.

habillement	isolement thermique	
	(clo)	(m ² K/W)
•Aucun	0	0
• Shorts	0,1	0,015
• Habits légers d'été	0,5	0,08
• Habits légers de travail	0,7	0,11
• Habits d'hiver pour l'intérieur	1	0,155

Tableau-II.1 : Isolement thermique dû aux vêtements

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006

II.3.6- Le métabolisme :

Il s'agit de la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C. Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

¹² GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. p : 84

Le niveau d'activité se mesure en "met", les valeurs caractéristiques de l'activité métabolique des individus sont fournies dans le tableau suivant :

Activité	Production de chaleur	
	MET	W/m ²
•Repos	0,8	46
• Assis inactif	1	58
• Debout, décontracté	1,2	70
• Assis en activité travaux de bureau	1,2	70
• Activité légère debout	1,6	93
• Activité moyenne debout	2	116
• Activité importante (travaux lourds des industries)	3	174

Tableau –II.2 - Production de chaleur en fonction de l'activité

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006

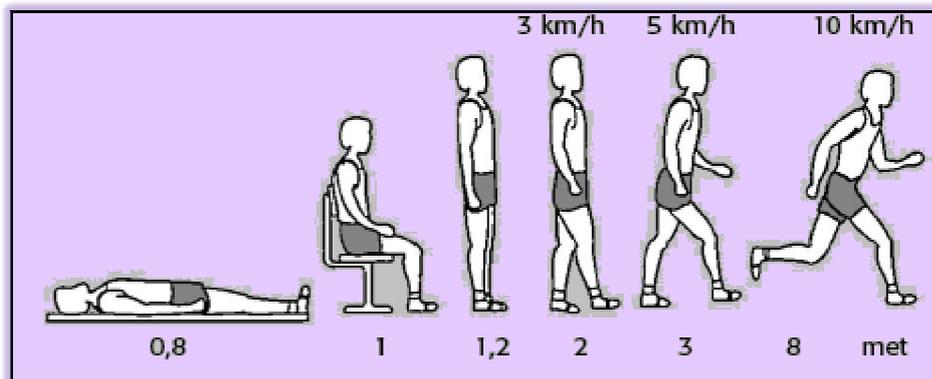


Figure-II. 4 - Production de chaleur en fonction de l'activité

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006

Selon le Guide technique de la diffusion d'air, les conditions qui déterminent le bien-être thermique (cités dans le tableau suivant), selon la norme ISO 7730 (conditions thermiques modérées), sachant que ces conditions ne prennent pas en compte les exigences d'économie d'énergie.

<p>• Température opérative : Été : 23/26 °C Hiver : 20/24 °C</p>
<p>• Différence verticale de température < 2/3°C/m</p>
<p>• Température surfacique du sol : En général : 19/26°C Un sol rayonnant : 19/29°C</p>
<p>• Asymétrie de Rayonnement : En général : < 10°C Plafond radiant : < 5°C</p>
<p>• Vitesse moyenne de l'air Vr : Été : < 0,25 m/S Hiver: < 0,15 m/S</p>

Tableau-II.3 – les seuils de bien-être thermique

Source : Guide technique de la diffusion d'air, 2006

II.4-Gêne thermique localisée :

Les inconforts locaux sont causés par plusieurs facteurs à savoir : l'asymétrie de rayonnement horizontale et verticale, température du sol, des différences de température d'air le long de corps, la sensation de courant d'air, une humidité excessive ou insatisfaisante.

II.4.1-Asymétrie de rayonnement :

Est définie par la différence de température radiante moyenne entre deux faces d'une pièce. Elle peut engendrer une sensation d'inconfort. « *Les parois froides ou chaudes entraînent des déséquilibres au niveau des échanges radiatifs qui peuvent engendrer une sensation d'inconfort. On considère qu'il n'y a pas de gêne si, à 1m devant la façade, l'écart entre la température radiante orientée vers cette façade et la température radiante vers la cloison opposée ne dépasse pas 8° C* »¹³. D'après la figure-II.5, on notera que le plafond chaud est nettement moins bien supporté qu'un plafond froid, alors qu'une paroi chaude est préférée qu'une paroi froide.

Généralement, « *l'asymétrie de température rayonnante due à des surfaces verticales froides doit être inférieure à 10°C. L'asymétrie rayonnement due à un plafond chauffant doit être inférieure à 5°C* »¹⁴.

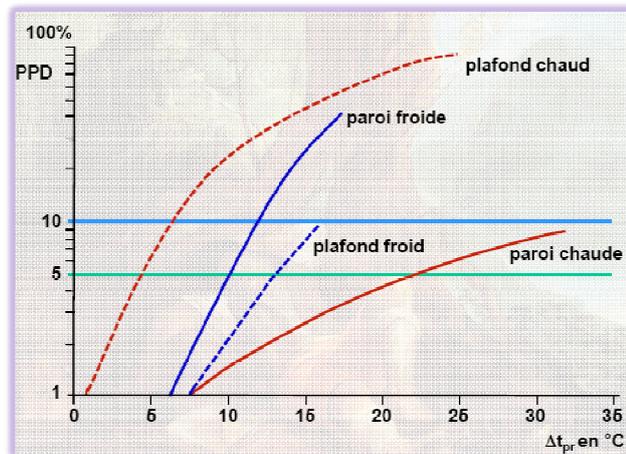


Figure-II.5 : Asymétrie de la température rayonnante et insatisfaction

Source : www.ergonomie.chups.jussieu.fr

II.4.2-Température du sol :

La température du sol est plus ressentie au travers des chaussures légères

« *Les limites pour les températures du sol sont comprises entre 19 et 29°C. La température du sol dans les pièces prévues pour des séjours prolongés ne doit pas excéder 26°C* »¹⁵.

¹³ Chemillier d'après Vinet Jérôme, Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, thèse de doctorat, 2000. P : 105

¹⁴ Vinet Jérôme, Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, thèse de doctorat, 2000. P : 105

¹⁵ Guide technique de la diffusion d'air, 2006

La figure suivante montre qu'une corrélation négative entre la température du sol et le pourcentage des gens insatisfaits où la T sol est $< 24^{\circ}\text{C}$, au delà de cette valeur on remarque une corrélation positive.

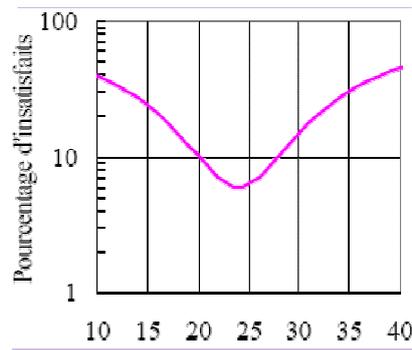


Figure-II.6: effet de la température du sol

Source : www.tudor.lu/cms/henritudor/content.../CA_Roulet_Batiment_Sain08.pdf

II.4.3-Différences de température d'air le long du corps :

On trouve parmi les différences de température d'air le long de corps sont celles qui existent entre pied et tête ... D'après le graphe suivant, on remarque qu'une augmentation de 4K de différence entre la tête et le pied a engendré un taux de 10% d'insatisfaits.

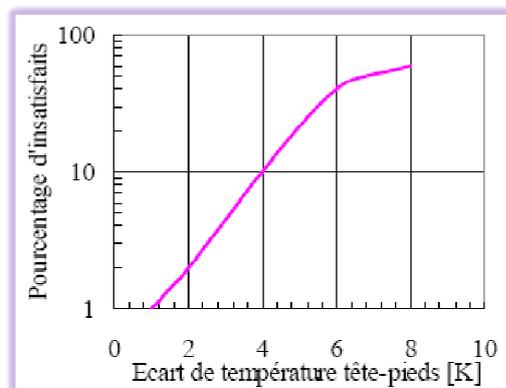


Figure-II.7 : Effet d'une différence de température entre la tête et les chevilles

Source : www.tudor.lu/cms/henritudor/content.../CA_Roulet_Batiment_Sain08.pdf

II.4.4-Différences de température en vertical :

En pratique, il est recommandé un différentiel maximum de température de 2°C pour chaque mètre de hauteur, pour se maintenir dans certaines limites de garantie, lorsque les conditions ne sont pas totalement optimum. « Dans les bâtiments on considère généralement que l'écart entre les températures mesurées à 1.1m et 0.1 m doit rester inférieur à 3°C »¹⁶.

II.4.5-Vitesse de l'air : Ce facteur est considéré comme l'un des principales sources d'inconfort local. Une vitesse de l'air variable est plus gênante qu'à vitesse stable. Mais aussi la qualité de l'air influe sur la sensation d'inconfort (chaud, froid).

¹⁶ Chemillier d'après Vinet Jérôme, Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, thèse de doctorat, 2000. P : 106

II.5- Les aspects du confort thermique :

Les interactions entre l'homme et l'environnement se déroulent selon trois mécanismes :

- ✦ L'aspect physique : concerne les différents transferts de chaleur entre l'homme et l'environnement
- ✦ L'aspect physiologique : s'intéresse au fonctionnement des récepteurs sensoriels et comment l'information est intégrée.
- ✦ L'aspect psychologique : est l'interaction entre les caractéristiques physiques de l'environnement et leurs résultantes sensorielles chez l'individu.

II.5.1- L'aspect physique :

II.5.1.1- L'échange thermique :

« L'homme produit et échange de la chaleur. Sa production de chaleur interne se répartit dans sa masse corporelle tandis que ces échanges thermiques externes se font à la surface cutanée »¹⁷. Et étant donné que l'homme se trouve dans un environnement physique (matériel), la diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon les lois de la physique : la convection, la conduction, le rayonnement et l'évaporation.

✦ La convection (C) : c'est l'échange de chaleur entre l'organisme et le fluide qui l'entoure (généralement gazeux). Qui représente plus de 35 % des pertes de chaleur. Elle dépend de la vitesse du fluide et la tenue vestimentaire.

-Selon la vitesse de l'air, il existe deux types de convection, la convection naturelle ou libre quand la vitesse de l'air est inférieure à 0,2 m/s et la convection forcée pour des vitesses supérieures à 0,2 m/s (c'est le cas des ventilateurs).

Lorsque la vitesse de l'air est élevée les échanges convectifs influent d'une façon importante sur le bilan thermique de l'individu, « Les échanges par convection sont réduits par les vêtements et augmentent avec la vitesse de l'air, d'où la recherche de courant d'air et le port de tenue légère en été ... Avec une humidité de 50%, un courant d'air de 0,5m/s donne sur la peau nue, une sensation d'abaissement de la température de l'air de 3,5°C »¹⁸.

Les échanges par convection sont régis par l'équation :

$$C = hc \cdot F_{cl} (T_a - T_{sk}) \dots \dots \dots \text{Eq.2}$$

où : hc : coefficient de transfert de chaleur par convection (w.m.k)

F_{cl} : facteur de réduction des échanges de chaleur par les vêtements (chaleur sèche)

T_a : température de l'air (°C) mesurée.

T_{sk} : température cutanée locale (°C).

¹⁷ DuBois cité par Candau V. (2003), "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "Habitat, confort et énergie". Actes de la 13^e Journée du CUEPE, 22 mai 2003, P : 5

¹⁸ www.aren.fr

☛ La conduction : dans le cas où l'individu se trouve en contact direct avec un solide (généralement : le mobilier), le corps humain échange la chaleur avec celui-ci par un mode de transfert qui est la conduction.

C'est un phénomène que l'on retrouve généralement lorsque la personne exerce une tâche de bureau où son corps se trouve fréquemment en contact avec le mobilier. Ce type d'échange dépend de la nature des solides (les propriétés physiques du solide, telle que la conductivité thermique) et leur épaisseur.

Mais dans la majorité des cas on peut le négliger, car il représente 1% de l'ensemble des échanges. En fait, l'impact de la conduction sur le confort thermique est très faible, même si le contact d'un carrelage frais peut apporter une sensation agréable en été, ou à l'inverse, le sable d'une plage ayant une sensation de brûlure.

☛ Le rayonnement (R) : et donné selon l'équation :

$$R = h_r \cdot F_{cl} (T_r - T_{sk}) \dots\dots\dots \text{Eq.3}$$

où: h_r : coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

T_r : température moyenne de rayonnement de l'environnement (°C).

Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan.

Selon Givoni, il existe d'autre élément intervenant sur l'échange thermique entre l'opérateur et l'ambiance, qui est la texture des vêtements, il a dit : « *Le régime de ces relations sera aussi affecté par d'autres facteurs tels que les propriétés des matériaux qui constituent les vêtements et la forme de ces vêtements, qui peuvent varier dans une très grande mesure* »¹⁹.

☛ L'évaporation (E) : l'évaporation est le moyen le plus efficace pour éliminer la chaleur produite par le corps humain. Elle existe sous plusieurs formes :

-Au niveau des voies respiratoires : dans les conditions courantes d'activité légère ou de repos, les pertes de vapeur d'eau par les poumons sont environ de 11,5 W (correspond à 360 g d'eau/jour). ces pertes augmentent au cours d'exercices musculaires.

-Au niveau de la peau : les échanges se font à deux manières :

-Diffusion de l'eau des couches superficielles de la peau (perspiration insensible) vers l'extérieur (en générale faible sauf au cours d'exercices musculaires).

-Sudation : l'extraction naturelle de l'eau s'effectue à partir des glandes sudoripares. En générale, La quantité de sueur évaporée est liée aux conditions de l'ambiance entourée par l'homme (l'humidité relative, température et la vitesse de l'air). D'après la figure 8, on remarque le taux de refroidissement par évaporation de la sueur est important avec l'augmentation de la vitesse de l'air et la température de l'air.

¹⁹ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. P : 40

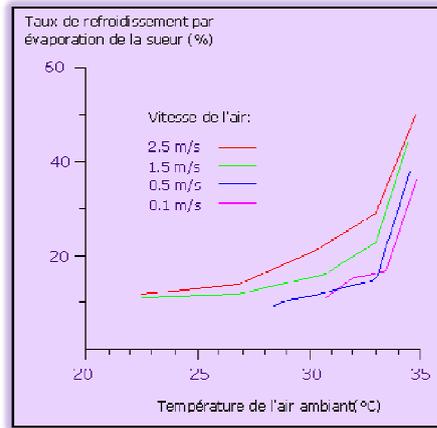


Figure-II.8 : Influence de la vitesse de circulation de l'air et de la température ambiante sur le taux de refroidissement par évaporation de la sueur
 Source : Gagge A.P cités par Millanvoye M, 2002-2003.

Étant donné que « l'évaporation de chaque gramme d'eau consomme à peu près 0.58 kcal »²⁰. La sudation est un élément performant pour lutter contre la chaleur.

C'est le moyen d'évaporation le plus important à condition que la sueur soit effectivement évaporée c'est-à-dire que l'air ambiant soit renouvelé et non saturé en vapeur d'eau.

$$E = h_e \cdot F_{pcl} \cdot w \cdot (P_{sH_2O} - P_{aH_2O}) \dots\dots\dots \text{Eq.4}$$

où : h_e : coefficient de transfert de chaleur par évaporation.

F_{pcl} : coefficient de réduction des échanges de chaleur sensible par les vêtements (chaleur latente).

w : mouillure cutanée allant de 0,1 (peu mouillé) à 1 (très mouillé, évaporation maximale permise par l'ambiance).

P_{sH_2O} : pression partielle de vapeur d'eau à la surface de la peau (mbar).

P_{aH_2O} : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant (mbar).

Il est utile de signaler que le corps perd également environ 6% de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

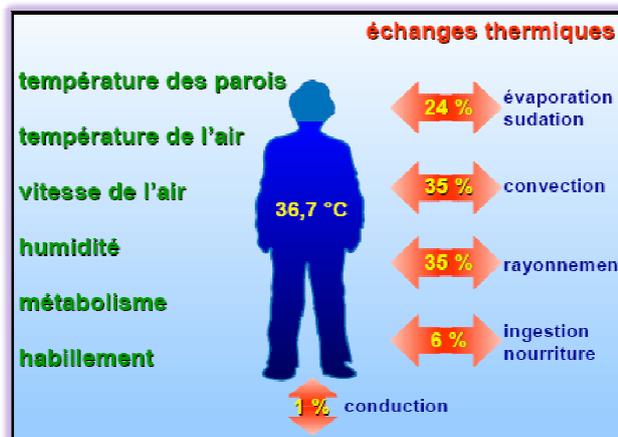


Figure-II.9 : les échanges thermiques entre l'ambiance et l'homme
 Source : De Herde, André. Liébard, Alain, 2005

²⁰ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. P : 45

II.5.1.2- Le bilan thermique :

Sous des conditions thermiques froides ou chaudes, le corps humain doit maintenir sa température corporelle autour de 36,7°C, cette dernière est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort. D'une autre manière, pour que l'être humain puisse entretenir ses fonctions vitales et mener ses activités, le corps consomme de l'énergie et produit de la chaleur qu'il doit évacuer.

Le corps améliore alors ses échanges avec l'environnement par des lois de la physique ou par des mécanismes physiologiques régulateurs qui permettent au corps de réguler la quantité d'énergie à produire et les procédés de perte de chaleur de telle manière que l'équilibre puisse être entretenu, parmi ces mécanismes on peut citer par exemple : lors d'un travail forcé les vaisseaux sanguins se dilatent pour que le sang apporte plus la chaleur vers les couches superficielles du corps. C'est tout un environnement dynamique, qui est gouverné par des formes mathématiques (plus, moins ou égale), c'est-à-dire un bilan thermique positif, négatif, ou neutre. L'équation suivante décrit l'échange thermique entre le corps et son environnement :

$$\text{Bilan} = \underline{M} + \underline{C} + \underline{R} - \underline{E} \dots\dots\dots \text{Eq.5}$$

Où : M : flux d'énergie produit par le métabolisme des organes (toujours positif).

R : Les échanges de chaleur par rayonnement

C : Les échanges de chaleur par convection

E : Les échanges de chaleur par évaporation

Selon les différentes conditions (d'ambiance et de travail), le bilan peut être :

Bilan > 0 :

L'individu est en hyperthermie

L'organisme emmagasine la chaleur. Les mécanismes de thermolyse ne sont pas suffisamment efficaces et risquent d'engendrer des pathologies.

Bilan < 0 :

L'individu est en hypothermie

Dans ce cas l'organisme perd plus de chaleur qu'il en gagne ou qu'il en produit.

Cette situation engendre elle aussi des pathologies.

Bilan = 0 :

Zone de neutralité thermique

Quand la température corporelle est stable, les échanges thermiques avec le milieu extérieur égalent à zéro (c'est la situation la plus favorable). L'opérateur se situe dans une zone de neutralité thermique.

II.5.2- L'aspect physiologique :

L'homme est un homéotherme, c'est-à-dire que sa température centrale est stabilisée à environ 37°C, en dépit des variations de la température extérieure. Il s'agit d'un équilibre entre la thermogenèse (production de la chaleur) et la thermolyse (perte de chaleur).

Cet équilibre permet les performances biologiques, mentales et physiques optimales. Le centre de la thermorégulation se situe dans l'hypothalamus.

II.5.2.1- Thermo-physiologie du corps humain :

Distribution corporelle des températures :

Le corps humain possède deux températures principales : La température centrale et la température de la peau, donc selon ces deux derniers l'homme se décompose en un noyau et un enveloppe extérieur, le dégradé des températures se commence depuis le centre vers l'écorce (la peau). Les limites exactes des températures ne sont pas fixes parce qu'elles dépendent de l'activité musculaires et de l'environnement physique.

✦ La température centrale :

L'homme pour assurer ses fonctions vitales produit de la chaleur, conséquence des réactions chimiques nécessaires au fonctionnement cellulaire. « *Même au repos, une centaine de watts sont produits en permanence et cette énergie dégagée sous forme de chaleur se propage de l'intérieur vers l'extérieur de l'organisme, véhiculée un peu par conduction tissulaire mais surtout par la convection sanguine. La répartition énergétique et les coefficients locaux d'échange de chaleur font que globalement le noyau central est de l'ordre de 37 °C alors que la surface périphérique (peau) est comprise entre 29-30 °C aux pieds et 34-35 °C au niveau de la tête* »²¹.

La limite du noyau central se varie selon l'ambiance thermique (chaude ou froide) et l'activité de l'homme, on rejoint les paroles de Millanvoye.M :

« *Seul le noyau corporel est homéotherme. Le volume du noyau est d'autant plus important que l'activité physique est élevée et l'ambiance plus chaude. Quand l'homme est immobile, au froid, l'enveloppe peut prendre une importance considérable et comprendre des segments corporels entiers* »²². (Voir figure-II.10)

²¹ Candas V. (2003), "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "Habitat, confort et énergie". Actes de la 13^e Journée du CUEPE, 22 mai 2003, P : 11

²² Millanvoye.M, "l'ambiance thermique", ergonomie-cours B1-CNAM,ed ;paris , 2002

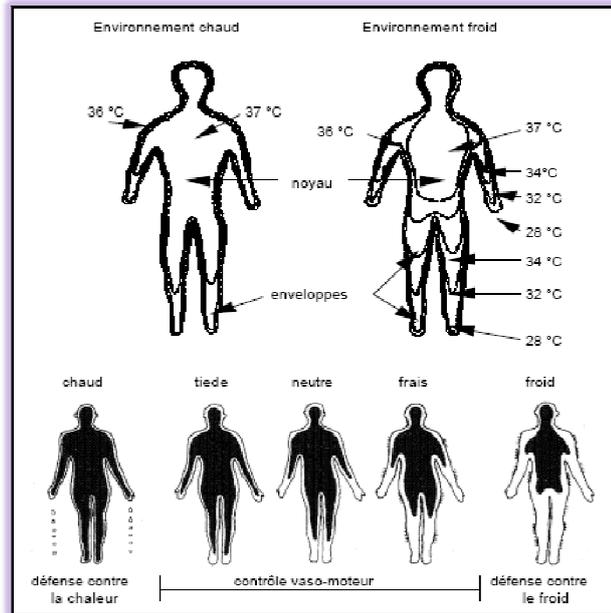


Figure-II.10 : Taille du noyau central de température constante dans différentes situations.

Source : Aschoff, Wever et Fox cités par Millanvoye M, 2002-2003.

↻ La température de peau n'est pas affectée par l'activité métabolique (au centre) : elle dépend exclusivement des variations des paramètres extérieurs. Tout changement de l'environnement (températures d'air ou de rayonnement, vitesse d'air) ou de l'isolement vestimentaire peut modifier la température cutanée.

L'étude de Edholm, O.G. et coll sur un groupe de (9 sujets) pendant 4 jours montre que la température centrale de l'homme dépend du temps, avec une valeur minimale la nuit et une valeur maximale le jour, ça explique le rôle du métabolisme de travail et le métabolisme ajoutés, mais aussi l'effet de l'ambiance thermique sur la température centrale). (Voir figure-II.11).

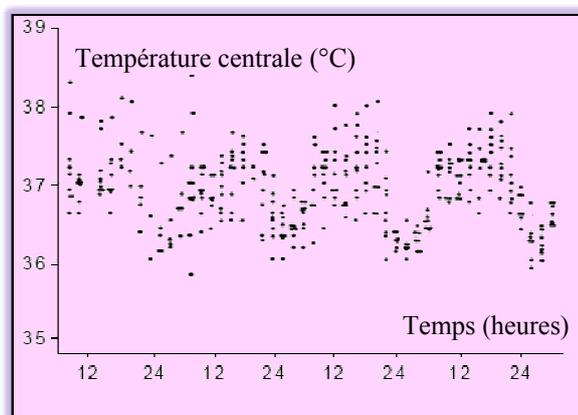


Figure -II.11 : Température centrale mesurée pendant 4 jours (9 sujets)

Source : Edholm, O.G. et coll. cités par Millanvoye M, 2002-2003.

Selon Candas.V : « Dans le cas du travail à la chaleur, l'activité physique et le climat chaud augmentent à la fois la température centrale et la température de peau »²³.

²³ Candas. V, "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "Habitat, confort et énergie". Actes de la 13^e Journée du CUEPE, 22 mai 2003, p : 16

II.5.2.2- Thermogenèse (production de la chaleur) :

Le métabolisme par définition : « *est le processus par lequel la nourriture absorbée par le corps se combine avec l'oxygène pour générer l'énergie requise pour le fonctionnement des divers organes du corps, tels que la contraction des muscles pendant le travail...* »²⁴. C'est l'ensemble des énergies produites par le corps humain, qui sont :

✦ Le métabolisme de base : dépense énergétique de l'organisme à la température de neutralité thermique ou à l'état de repos. Selon Givoni la valeur du métabolisme après l'arrêt complet des activités et dans une position couchée est prise comme référence sur le métabolisme de base.

✦ Le métabolisme de travail : dépense énergétique dû à l'activité de travail. Dans le cas d'un travail bien précis le métabolisme est relatif à : l'âge, le sexe, le poids et la grandeur.

✦ Les métabolismes ajoutés : Particulièrement la digestion.

II.5.2.3- Thermolyse (perte de chaleur) :

En générale, se sont les mécanismes qui permettent à l'organisme d'évacuer la chaleur vers l'environnement entouré par le corps humain. Quand l'environnement est défavorable (taux d'humidité important, absence de ventilation...), ces mécanismes ne sont plus efficaces et entraînent un stockage de la chaleur excédentaire pouvant engendrer des pathologies à plus ou moins long terme.

II.5.2.4- Thermorégulation :

D'après Givoni, la thermorégulation est : « *un système complexe de réponses automatiques et volontaires qui gouvernent le taux de perte de chaleur du corps, et dans certains cas, également la production de la chaleur. Bien que dépendant de facteurs physiques tels que des différences de tension de vapeur d'eau et de température entre la peau et l'environnement, l'échange de chaleur superficielle du corps peut être contrôlé par une régulation dynamique des divers systèmes physiologiques et des régimes vestimentaires* »²⁵. Deux types de thermorégulations peuvent être distingués : une thermorégulation physiologique végétative dont le but est de garder la température interne du corps à l'alentour de 37°C, et MOUJALLED.B : « *une thermorégulation comportementale, consciente ou inconsciente, qui permettent d'anticiper les changements rapides dans l'environnement afin de limiter les réactions physiologiques perçues comme désagréables* ».²⁶

²⁴ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. p : 41

²⁵ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. p : 52

²⁶ MOUJALLED Bassam, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, thèse de doctorat, Université de Lyon, 2007.P :24

II.5.2.4.1- Thermorégulation végétative :

La thermorégulation végétative est une défense physiologique du corps humain pour lutter contre une ambiance thermique chaude ou froide (les fluctuations climatiques de l'environnement), afin de stabiliser leur température interne à 37°C. Donc on peut distinguer deux types de thermorégulation végétative :

Contre une ambiance thermique chaude :

Sous une température élevée, le corps humain réagit de deux manières par le mécanisme d'évaporation et convection, l'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins (la vasodilatation sous-cutanée) favorise les échanges thermiques avec l'extérieur par convection.

Ensuite, l'évaporation de la sueur permet d'évacuer des calories (thermolyse).

Contre une ambiance thermique froide :

L'organisme accroît sa production de chaleur métabolique (thermogenèse) ou bien réduire les échanges thermiques vers l'extérieur par les mécanismes suivantes :

Face au froid, l'organisme diminue le diamètre des vaisseaux sanguins (vasoconstriction sous-cutanée), donc réduire le débit sanguin et par conséquent les échanges thermiques avec le milieu extérieur. *« Si le froid persiste, l'organisme accroît sa production de chaleur métabolique (thermogenèse) par l'augmentation du tonus musculaire et les frissons d'une part et par les mécanismes d'oxydation dans le foie d'autre part ».*²⁷

II.5.2.4.2- Thermorégulation comportementale :

Des ajustements comportementaux aident l'organisme de limiter l'ensemble des réponses physiologiques et même technologiques par de simple réactions qui se produisent immédiatement ou après réflexion à cause des stimulus climatiques. Selon Narçon, S :

*« Les informations en provenance des différents récepteurs intégrées au niveau cortical, permettent à l'homme de réagir consciemment et de diriger ses comportements pour lutter efficacement contre le froid : il peut réduire les surfaces exposées au milieu extérieur en se repliant sur lui-même, il peut produire de la chaleur en modifiant son activité musculaire, il peut s'isoler et se protéger de l'environnement en utilisant les vêtements, les habitations, et en fuyant les environnements nocifs (recherche d'un abri contre le froid ou le vent) »*²⁸.

Si le climat est chaud l'homme cherche encore une fois le confort, mais cette fois avec des ajustements comportementaux contradictoires à ceux d'un climat froid.

²⁷ Buser & Imbert 1975, cités par Narçon, 2001 : caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, 2001, p : 8

²⁸ NARÇON. Sandrine, caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, 2001, p: 8

Par ailleurs, l'homme peut favoriser les pertes thermiques en augmentant les surfaces exposées au milieu extérieur (changement de position, retrait de vêtements), limiter la production de chaleur métabolique en minimisant ses efforts physiques, et se protéger de la chaleur, en se mettant à l'ombre par exemple »²⁹. Le degré des réactions physiologiques et comportementale dépend bien sure de l'ambiance où se trouve l'individu de leur activité mais aussi par le mécanisme de l'acclimatement.

La régulation technologique : « Complémentaire à l'adaptation comportementale, la régulation technologique est considérée aussi comme un moyen efficace de thermorégulation à travers la conception des constrictions offrant des environnements internes adaptés à l'occupant humaine »³⁰.

La figure II.12 explique le principe des différents types de thermorégulation.

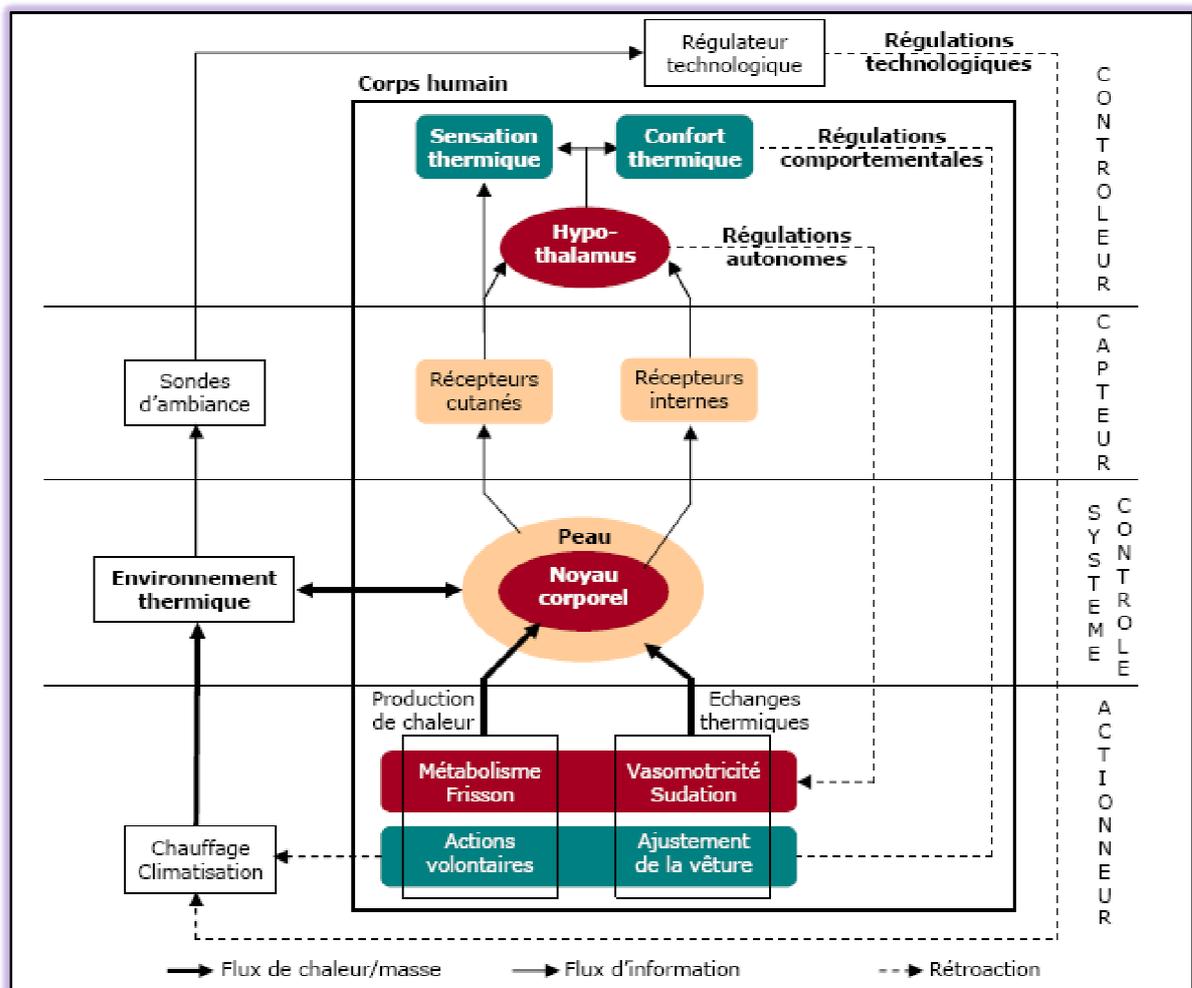


Figure-II.12 : Thermorégulation végétative, comportementale et technique
Source : Moujalled .B, 2007.

²⁹ NARÇON. Sandrine, caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution a l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, 2001, p : 10

³⁰ MOUJALLED Bassam, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, thèse de doctorat, Université de Lyon, 2007.P :27

II.5.3- L'aspect psychologique :

Au delà des aspects physiques et physiologiques du confort thermique on trouve l'aspect psychologique du confort thermique. D'une manière générale la sensation thermique est relative à des paramètres liés à l'occupant comme l'âge, le poids, le sexe... et d'autres sont liés à l'ambiance du local, la couleur de l'ambiance peut ainsi faire évoluer la sensation de confort ou d'inconfort ressenti. La classification thermique des couleurs, associée à la notion de température de couleur, permet de définir des couleurs froides (le bleu ou le vert), et des couleurs chaudes (le rouge ou le jaune). L'influence de la couleur sur la perception du confort thermique demeure toutefois encore largement méconnue.

II.6- Approche sensorielle :

Selon Givoni, la détermination des réponses subjectives des usagers est relative à leurs propres sensations vis-à-vis d'une ambiance thermique bien précise. Ce processus est à l'inverse des réponses physiologiques qui peuvent être mesurées de manière objective.

II.6.1- La sensation thermique :

La détermination des réponses subjectives d'une ambiance thermique bien déterminée dépend de la propre évaluation de la personne soumise à ce contexte. Selon Narçon « *Afin de percevoir son environnement et de pouvoir réagir en conséquence, de manière autonome ou volontaire, l'être humain est équipé de capteurs sensoriels. Ils constituent une interface entre le sujet et le monde extérieur. Les mécanismes sensoriels sont les mêmes, quelle que soit la stimulation* »³¹. De ce fait, la perception de la chaleur ou du froid ambiant est le résultat d'une activité nerveuse ayant son origine aux thermorécepteurs qui se trouvent aux extrémités des nerfs. Il existe deux types de thermorécepteurs : pour la chaleur et pour le froid.

La sensation thermique correspond à l'aspect qualitatif et quantitatif de la perception de l'état thermique personnel. « *Elle est liée aux messages sensoriels des différents thermorécepteurs informant l'hypothalamus qui les intègre en une information globale capable de donner information de l'état thermique de l'individu* »³². Dont la fréquence de l'information est proportionnelle à la température. « *Les thermorécepteurs sont capables d'adaptation, c'est-à-dire que leur activité s'estompe avec le temps alors que le stimulus perdure. Ceci a pour conséquence que la même exposition à un stimulus donné engendrera des activités (donc des sensations) différentes selon la température d'adaptation initiale* »³³

³¹ NARÇON. Sandrine, caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort, thèse de doctorat, l'École Pratique des Hautes Etudes, 2001, p : 9

³² Narçon d'après MOUJALLED Bassam, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, thèse de doctorat, Université de Lyon, 2007. p : 36

³³ Candas. V, "L'homme dans son environnement climatique : facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques". In : "Habitat, confort et énergie". Actes de la 13^e Journée du CUEPE, 22 mai 2003, p : 12

II.6.2- Échelles de sensation thermique :

Certaines études ont abouti à la création d'une échelle de variation de la sensation thermique allant du chaud au froid en 7 étapes (tableau-II.4), dont la différence entre une étape et une autre qui la succède environ 3°C. La zone de confort de cette échelle est susceptible de varier entre 17 et 31°C selon les conditions climatiques et l'activité de l'opérateur. Pour évaluer la sensation thermique, différentes échelles ont été développées, les plus largement utilisées sont l'échelle de Bedford et l'échelle de l'ASHRAE.

Echelle Bedford	Echelle ASHRAE	Indice numérique
beaucoup trop chaud	chaud	7
trop chaud	tiède	6
confortablement tiède	légèrement tiède	5
confortable	neutre	4
confortablement frais	légèrement frais	3
trop frais	frais	2
beaucoup trop frais	froid	1

Tableau-II.4 : Echelles de sensation thermique

Source : Millanoye M. (2002), "L'ambiance thermique". Ergonomie - Cours B1- CNAM ed. Paris. In : "www.cnam.fr".

L'échelle de l'ASHRAE est préférée à celle de Bedford qui confond l'agrément et la sensation.

On peut distinguer aussi les échelles d'évaluation et de préférence d'une sensation thermique, qui sont l'échelle d'agrément et de préférence. Les méthodes d'évaluation des ambiances thermiques à l'aide des jugements subjectifs sont relatives à la norme internationale ISO 10551, le tableau-II.5 résume les différentes sensations, évaluation et de préférence d'une ambiance thermique bien déterminée.

Echelle de jugements perceptifs (sensation)	Echelle de jugements d'évaluatifs	Echelle de préférence thermique
+3 Très chaud	4 Acceptable	+3 Beaucoup plus chaud
+2 Chaud	3 Légèrement inacceptable	+2 Plus chaud
+1 Légèrement Chaud	2 Inacceptable	+1 Un peu plus chaud
0 Neutre	1 Très inacceptable	0 Ni plus chaud ni plus froid
-1 Légèrement froid		-1 Un peu plus froid
-2 Froid		-2 Plus froid
-3 Très froid		-3 Beaucoup plus froid

Tableau-II.5 : Les échelles de jugements subjectifs sur les conditions thermiques

Source : Moujalled .B, 2007. P : 40

Il faut noter que la meilleure évaluation d'une ambiance thermique c'est celle qui passe par les trois étapes qui sont : la sensation, l'agrément et enfin la préférence.

II.7-Les stratégies d'évaluation du confort thermique :

Les stratégies d'évaluation du confort thermique représentent l'ensemble des instruments d'aide à la conception, à partir de l'analyse des données climatiques on peut ressortir un nombre de recommandations qui sert à améliorer l'espace habité ou bien à le remédier. Les solutions architecturales proposées par ces méthodes concernent les deux périodes : chaude et froide et même journalière. Dans ce qui suit, on va présenter quelques indices thermiques et ensuite deux méthodes d'analyse bioclimatique.

II.7.1-Les indices thermiques

Ces indices sont de différents types. Tous les chercheurs dans ce domaine ont essayé de présenter un abaque sur lequel un nombre donné peut correspondre à diverses combinaisons des variables climatiques, des vêtements et, dans la plupart des cas, du travail. selon Givoni.B : *« il est nécessaire d'évaluer les effets combinés des facteurs d'ambiance sur les réponses physiologiques et sensorielles du corps et d'exprimer toute combinaison de ceux-ci sous la forme d'un seul paramètre. Ainsi tous les facteurs sont combinés à l'intérieur d'une seule formule, connue sous le nom d'indice thermique »*³⁴.

II.7.1.1-Indice de la température effective (E.T) :

Entre 1923-1925, le laboratoire de recherche de « l'American society of heating and air conditioning engineers » (A.S.H.A.C.E) a développé un indice qui s'appelle "l'indice de la température effective" représenté sur un abaque en fonction d'une combinaison des facteurs climatiques et qui sont : la température de l'air, l'humidité, et la vitesse de l'air. Les limites des facteurs climatiques couverts par la température effective sont :

- ✦ Température d'air : 1 à 43 °C
- ✦ Température à bulbe humide : 1 à 43 °C
- ✦ Vitesse d'air : 10 à 350 cm/s.

L'indice a été effectivement utilisé pour prescrire la limite des contraintes thermiques sur des recrues marines non acclimatées aux U.S.A. Il a été recommandé que la formation des recrues devrait cesser quand l'indice a atteint 29.40 °C et toute l'activité ardue dévie.

Les expériences ont basé sur la réaction humaine pour déterminer les effets des combinaisons liés aux facteurs d'ambiance, où les sujets se déplacent entre deux pièces. Deux échelles sont développées, pour des sujets à demi-nus et pour des sujets habillés de vêtements d'été.

Il existe deux abaques, l'un se rapportant à des hommes travaillant nus jusqu'à la ceinture, l'autre à des hommes complétement habillés pour le travail sous abri.

³⁴ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. p : 93

F.E .Smith a proposé une modification sur cet indice, il introduit le taux de sudation comme une variable dépendante à l'indice de la température effective selon différents métabolismes. L'indice de la température effective est encore celui qui est utilisé largement, il a le mérite de la simplicité et n'exige pas d'instrumentation sophistiquée.

Les incertitudes sur cet indice se manifeste, car il est basé sur des impressions thermiques instantanées et ne prend pas en considération les effets de la chaleur radiante lors de l'élaboration de l'indice (la température effective original). Soutenant encore par ça l'avis de Givoni.B : « *Son emploi dans la comparaison des différentes ambiances, ou dans le choix d'alternatives pour la conception des bâtiments et du conditionnement d'air, peut en certains cas conduire à des résultats erronées* »³⁵

II.7.1.2-Indice de la température résultante (T.R) :

L'indice de la température résultante est proposé par Missenard A. (1959).cet indice est basé sur l'hypothèse que l'équilibre thermique serait maintenu entre le corps et l'ambiance (la température humide, la vitesse de l'air, le métabolisme, et les vêtements) malgré les variations de l'humidité et la vitesse de l'air, appliqués sur des sujets au repos sans aucune activité.

Cet indice est également basé sur la température de l'air saturé, ses relations avec les réactions physiologiques sont non linéaires, comme pour l'indice de la température effective (T.E), seulement la durée d'exposition des sujets aux conditions climatiques est plus longue.

Cet indice est encore dénommée température opérative, selon Martinet.C et Meyer J.P la température opérative est définie comme la température d'une enceinte virtuelle où la température de l'air et la température radiante sont égales, ce qui induit le même flux d'échange de chaleur par convection et rayonnement.

« *Si la vitesse de l'air est nulle ou négligeable, ce qui est souvent le cas lorsqu'il n'y a pas de courant d'air, la température opérative est la moyenne arithmétique de la température de l'air et de la température radiante. Si la vitesse de l'air vaut 2m/s ou plus, la température opérative est égale à la température de l'air, les surfaces environnantes n'ont plus d'effet sensible* »³⁶. On peut calculer la température opérative selon l'équation suivante :

$$Top = a Ta + (1-a)Tr \quad \dots\dots\dots \quad Eq.6$$

Où : Top = température opérative (°C)

a = 0,5 + 0,25v, a = facteur obtenu selon la vitesse de l'air (v), Ta = température de l'air (°C),

Tr = température moyenne de radiante (°C), v : la vitesse de l'air

Suivant les normes de l'ISO 7730 les seuils de confort pour la température opérative sont comme suit : - Pour l'été : 22.5°C < Top < 28°C

³⁵ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur ; Paris, 1978. p : 97

³⁶ SDS

-Pour l'hiver : $20^{\circ}\text{C} < T_{op} < 23.5^{\circ}\text{C}$

La figure suivante (II.13) donne la température opérative idéale (un PMV nul en fonction des conditions suivantes : le métabolisme, l'habillement, la vitesse de l'air moins de 0,1m/s, et une humidité relative varie entre 35 à 65 %). A titre d'exemple, à un isolement vestimentaire lourd de 1.5 clo pour un métabolisme de travail très léger estimé à 2 met, la température opérative optimale de confort doit être de 12.2 °C.

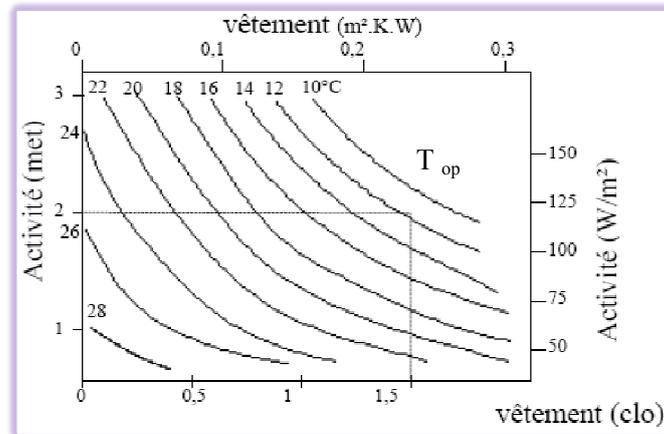


Figure-II.13 : La température opérative idéale en fonction du métabolisme et l'habillement

Source : Vogt J.J, 1985 cités par Martinet C. & Meyer J.P, 1999.

II.7.1.3-Le taux de sudation prévu après quatre heures d'exposition (TSP4) :

L'indice « taux de sudation prévu après quatre heures d'exposition : TSP4 » a été développé par Mc Ardle et al, pendant la 2^{ème} guerre mondiale au « *royal naval research establishment* » en Angleterre. L'expérimentation estime le taux de sudation chez des hommes exposés en laboratoire à divers ambiances et auxquels étaient imposées différentes dépenses énergétiques. Le TSP4 permet une estimation fiable de la contrainte thermique vue sa corrélation entre plusieurs grandeurs physiques de l'ambiance thermique, ainsi que les caractéristiques de l'individu (production de la chaleur métabolique et deux types de vêtements). On peut lire les valeurs de l'indice sur l'abaque à partir des températures de bulbe sec et humide et de la vitesse de l'air. Encore, l'expérimentation ne réside pas sur des impressions instantanées, mais sur une réaction physiologique après quatre heures d'exposition à différentes ambiances.

Mais, son application aux ambiances à degré d'humidité faible est imprécise ; elle n'est donc pas recommandée lorsque celui-ci descend à moins 40%. Donc l'emploi de l'abaque TSP4 est acceptable pour des contraintes thermiques modérées à fortes.

Les domaines des conditions climatiques couvertes par l'indice sont : température de globe entre 27 à 57°C, température au bulbe humide (T.B.H) : 16 à 36 °C, vitesse du vent : 5 à 250

cm/s, niveau de métabolisme : 54 à 200 Kcal/m² .h, vêtements : shorts seulement ou short et une chemise.

II.7.1.4-Indice de contrainte calorifique (I.C.C) :

En 1936, Winslow et al ont introduit la notion de calorimétrie fractionnelle, c'est-à-dire la détermination des quantités de chaleur échangées par les diverses voies selon les principes de la physique. Après, en 1955 Belding & Hatch ont les utilisés dans la définition d'un nouvel indice de contrainte thermique (I.C.C). Celui-ci est déduit des flux de chaleur échangés avec l'ambiance par rayonnement et par convection ($R + C$) et de la production de chaleur métabolique (M) dont la somme représente la charge thermique totale à dissiper par évaporation (E_{req}) pour maintenir l'équilibre thermique.

L'indice a été basé sur plusieurs hypothèses d'ordre physiologique.

- ☛ Au repos, la contrainte thermique totale exerçant sur les sujets est égale à l'évaporation requise de la sueur. $E=M +R+C$ Eq.7
Où : R : rayonnement, C : convection, M : métabolisme, E : évaporation
- ☛ L'effort physiologique imposé au corps par une contrainte calorifique donnée est déterminé par le rapport de l'évaporation requise sur la capacité évaporatoire maximale de l'air E_{max} .
- ☛ Lorsque le corps est soumis à la contrainte calorifique, la température cutanée est maintenue stable.
- ☛ Après huit heures d'exposition aux effets de l'ambiance pour une personne moyenne, la capacité maximale de sudation est estimée à 1L/jour pour donner une valeur de refroidissement de 600 kcal/h.

Les domaines des facteurs couverts par l'I.C.C sont : température du bulbe sec : 21 à 49 °C, tension de vapeur d'eau : 3 à 42 mm Hg, une vitesse d'air entre : 0.25 à 10 m/s et un métabolisme : 100 à 500 Kcal/h

II.7.1.5-Indice de contrainte thermique (I.C.T) :

Indice de contrainte thermique est tiré de plusieurs équations qui forment un modèle mathématique décrivant les mécanismes biophysiques, qu'implique le maintien de l'équilibre thermique entre le corps et le milieu ambiant, compte tenu des variations du pouvoir thermolytique de la sudation. Cet indice fournit une estimation linéaire continue de la contrainte thermique ; il est utilisable pour évaluer l'astreinte physiologique lorsque la sudation reflète la charge thermique.

Les domaines des facteurs couverts par l'I.C.T. sont : température d'air : 20 à 50 °C, tension de vapeur d'eau : 5 à 40 mm Hg, vitesse d'air : 0.1 à 3.5 m/s, rayonnement solaire : totalité du

domaine 600 Kcal/ h, métabolisme : 100 à 600 Kcal/h, tenue vestimentaire : semi nudité, vêtement léger d'été, combinaisons industrielles ou militaires.

II.7.1.6-PMV et PPD :

Le PMV et PPD sont des modèles d'évaluation des conditions du confort thermique développé par Fanger. L'indice de vote moyen prévisible (PMV, Predicted Mean Vote) est un indice d'évaluation du climat intérieur selon une échelle comporte sept réponses :

(+ 3 chaud), (+ 2 tiède), (+ 1 légèrement tiède), (0 neutre), (- 1 légèrement frais), (- 2 frais), (- 3 froid). L'indice PMV peut se calculer d'après les équations de référence en fonction des paramètres suivants : activité physique, degré d'habillement, température sèche, pression partielle de la vapeur d'eau, température rayonnante moyenne et vitesse d'air.

La sensation thermique n'étant pas suffisante pour exprimer le confort, Fanger a proposé un autre indice qui complète le PMV, le « PPD » (pourcentage prévu des insatisfaits). Cet indice donne des informations sur le pourcentage de la population insatisfait vis-à-vis d'une ambiance thermique. Les expériences réalisées par P.O. Fanger avec des groupes de personnes confirment qu'il existe une relation entre les indices et cela selon l'équation suivante : $P.P.D. = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2 \cdot PMV^2)]$ Eq.8

Selon la norme ISO, l'ambiance thermique est acceptable ou propice au confort thermique pour la majorité des personnes qui y sont soumise, quand le PMV est compris entre les deux sensations légèrement tiède et légèrement frais : $-1 < PMV < +1$

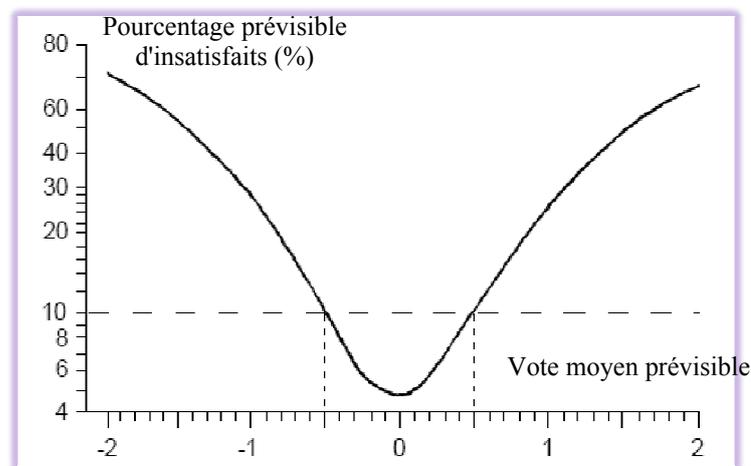


Figure-II.14 : Détermination du pourcentage prévisible 'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prévisible (PMV)

Source : Millanoye M. (2002)

II.7.1.7-Indice (WBGT) :

L'indice (WBGT) est l'abréviation de Bulb Glob Température fait l'objet de la norme internationale ISO 7243. Dans un souci de simplification, il ne requiert que le mesurage de la température du globe noir (Tg) et de la température humide naturelle (T hn).

II.7.2- Les méthodes d'analyse bioclimatique :

Les diagrammes bioclimatiques se sont des méthodes pour analyser le climat d'une région en utilisant les données climatiques et cela permet de prédire la zone de confort humain, ils proposent également, des moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent rétablir la zone de satisfaction thermique.

L'intérêt principal du diagramme bioclimatique réside sur la possibilité d'avoir des réponses qui peuvent aider les concepteurs dans leurs tâches, en d'autres termes, les moyens architecturaux de contrôle climatique.

II.7.2.1- Méthode d'Olgay :

La méthode d'Olgay a été la première expérience pour systématiser l'adaptation de la conception des bâtiments aux exigences des conditions climatiques. Selon Givoni.B : « *Cette méthode est basée sur un «diagramme bioclimatique» mettant en évidence la zone du confort humain en relation avec la température d'air ambiant et l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur évaporative* »³⁷

La structure générale du diagramme d'Olgay est basée sur trois zones (voir figure II.15) :

La zone de confort : au centre

La zone du froid : qui nécessite le chauffage passif (rayonnement solaire) ou actif pour rétablir le confort.

La zone du chaud : se situe au dessus de la ligne d'occultation où il est nécessaire d'introduire : l'occultation solaire, la vitesse de l'air, ou le refroidissement par évaporation

Selon B.Givoni la méthode d'Olgay s'effectue selon la démarche suivante :

- Compilation des données climatiques locales, comprenant les températures, le vent, les rayonnements et l'humidité.
- Constitution d'un catalogue des données climatiques sur une base annuelle, et mise au point d'une série de diagrammes montrant la répartition annuelle des éléments du climat.
- Report des données rassemblées sur la température ambiante et l'humidité sur le diagramme bioclimatique.
- Établissement des facteurs de conception, tels que les formes du bâtiment et l'orientation, la position, la taille et la protection des ouvertures et des baies vitrées etc. Pour compenser les inconvénients des conditions climatiques ambiantes en «maximisant» le chauffage pendant la période de «sous-échauffement" et en le «minimisant» pendant le «surchauffement».

³⁷ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris, 1978. p : 324

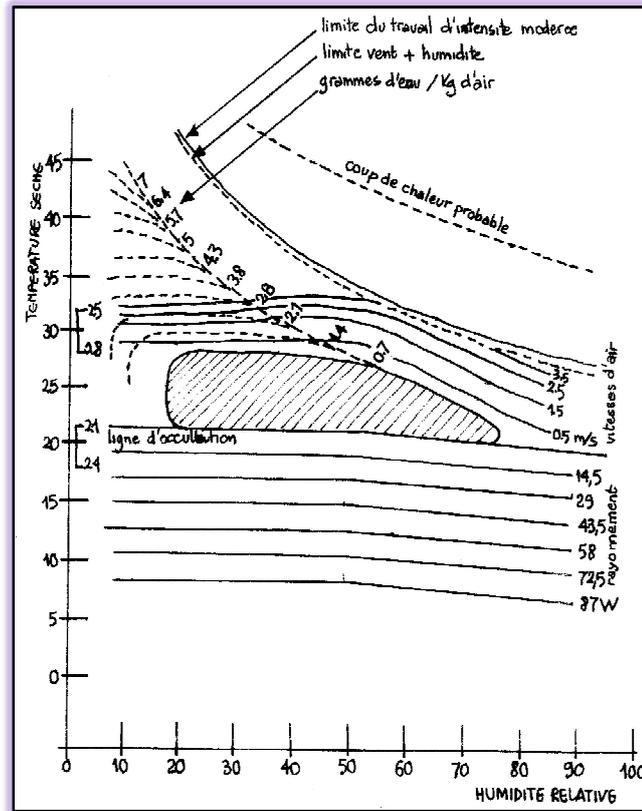


Figure-II.15 : Diagramme bioclimatique de Olgyay

Source : traduit par Mazouz 2001, d'après Olgyay, 1973

II.7.2.2- Méthode de GIVONI :

Pour évaluer les exigences physiologiques du confort, Givoni a utilisé dans la présente méthode l'indice de contrainte thermique, cette analyse sert à déterminer les grandes lignes de la conception du bâtiment qui permettent de garantir le confort ; mais également propose une estimation de l'ambiance intérieure attendue basée sur le climat extérieur.

L'analyse se déroule comme suit :

➤ *Analyse du climat* : l'analyse prend en considération les données extrêmes diurnes du climat, c'est-à-dire les valeurs maximales et minimales des facteurs climatiques pour bien préciser les zones de sur-échauffement et de sous-échauffement.

➤ *Choix de l'approche dans les climats chauds* : l'évaluation du confort intérieur est basée sur deux méthodes : la ventilation efficace et la réduction de la température

➤ *Diagramme bioclimatique du bâtiment* : le Diagramme bioclimatique montre les moyens d'intervention pour lutter contre les fluctuations climatiques extérieurs par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent être utilisés. Ce diagramme a été élaboré selon les conditions suivantes :

-Conditions liées aux occupants :

Ce diagramme a initié pour des sujets acclimatés, au repos ou engagés dans une activité sédentaire, avec un habillement de l'ordre de 1 clo.

-Conditions liées à la protection contre le rayonnement solaire :

Il est supposé que les apports solaires sont négligeables à travers toute l'enveloppe (l'enveloppe a des protections solaires efficaces), sauf en climat froid, l'énergie solaire peut être signalée.

-Conditions liées aux bâtiments :

L'analyse bioclimatique est faite pour des bâtiments non climatisés ni chauffés.

Ces hypothèses étant posées pour faire ressortir les différentes zones : de confort, de sur-échauffement en été et de sous-échauffement en hiver. Et donc, il s'agit de proposer les mécanismes pour remédier les anomalies climatiques.

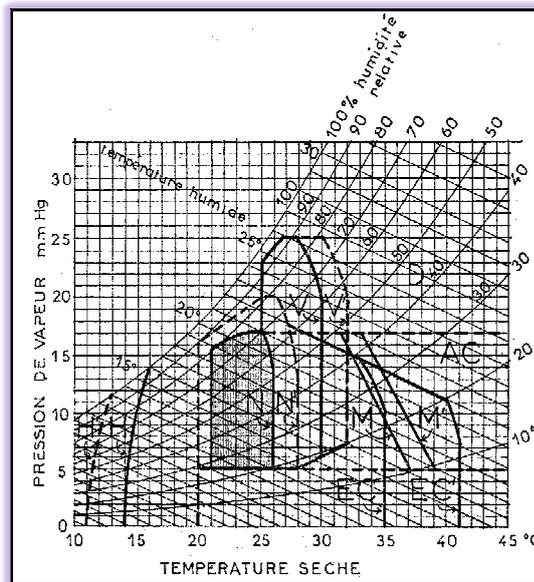


Figure-II.16 : Diagramme psychrométrique de Givoni

Source : Givoni, 1978

- La figure II.16 montre la plage des conditions de confort sous lesquelles le confort est accessible en contrôlant seulement les températures intérieures en l'absence de la ventilation.

La limite des conditions supportables est notée par la zone (N') où la température à la limite supérieure de cette zone est entre 26 et 28 °C pour des tensions de vapeur d'eau de 5 et 20 mm de mercure, mais on peut également aller jusqu'à la droite (M) pour avoir le confort supportable. (M') est la lisière au-delà d'elle c'est de l'inconfort.

« Les températures limites de ces zones sont inversement proportionnelles à la tension de vapeur d'eau, variant entre 31 et 33 °C à 17 mm Hg et 37 et 39 °C à 5 mm Hg »³⁸.

(les zones consternées sont : (M), (M'))

- (V), (V') se sont des zones qui nécessitent l'utilisation de la ventilation pour atteindre le stade de confort.

³⁸ GIVONI Baruch, L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur ; Paris, 1978. p : 328

La zone limitée par la droite (V) s'applique aux bâtiments ordinaires qui ne sont pas spécifiquement conçus pour diminuer l'échauffement, et pour la zone (V') est destinée aux constructions de moyenne et forte résistance thermique avec des surfaces extérieures blanches. Les deux zones s'étendent respectivement entre 28 et 30 °C à 25 mm Hg et entre 30 et 32°C à 5 mm Hg.

Dans le cas où la tension de vapeur d'eau est de 17mm Hg et 32°C, il y a une aire intermédiaire dans laquelle le recours à la fois à la ventilation et au contrôle de température est possible, bien que l'on puisse atteindre la nuit des températures plus basses avec la première et que ce déficit de chaleur soit stocké dans la construction pendant la journée.

-EC et EC' délimitent les régions où le refroidissement par évaporation est applicable pour des bâtiments ordinaires et pour les bâtiments blancs bien isolés.

Au-delà de toutes les zones citées au dessus, les matériaux de construction et l'évaporation pour assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, on doit avoir recours aux systèmes de réfrigération mécaniques et d'air conditionné. Sur le diagramme cette zone est indiquée par la droite AC.

A des températures situées entre 20 et 27°C et une tension de vapeur d'eau inférieure à 5 mm Hg, une humidification supplémentaire est nécessaire pour éviter l'irritation (zone W).

Au delà de la zone neutre Les limites de cette zone (H et H') dépendent des propriétés de la structure des bâtiments.

Conclusion :

L'étude des ambiances est interdisciplinaire, elle représente la combinaison entre trois approches qui sont d'ordre physique, sensible, émotionnelle. En ce sens, l'ambiance n'est pas restreinte aux simples données environnementales si pertinentes soient-elles, mais elle est essentiellement constituée par des représentations perceptives. Une ambiance thermique de sa part se varie selon le facteur spatio-temporelle et climatique, d'un lieu varie selon le jour, l'heure, la météo et les utilisateurs. Pour une appréhension de ce phénomène, il est nécessaire d'analyser le système qui forme l'interaction entre habitat et l'occupant.

Aussi, le confort thermique est un élément essentiel pour le bien être de l'occupant dans son environnement bâti. La prise en compte de celui-ci dans l'habitat implique de considérer leur différents aspects. Les paramètres qui influencent le confort thermique peuvent être divisés en deux types : les paramètres physiques (telles que la température de l'air, la vitesse de l'air..) et les paramètres d'ordre personnels (comme l'habillement, l'activité). L'homme est un homéotherme, il doit maintenir sa température interne voisine de 37°C, l'adaptation à chaque ambiance implique des réponses d'ordre physiologique, comportementale et parfois technique pour assurer l'équilibre entre le corps et l'environnement.

De ce fait, certaines donnent la définition en intégrant des facteurs physiologiques, comme les travaux de Givoni, qui présente le confort thermique comme étant l'ensemble des conditions pour lesquelles les mécanismes thermorégulateurs du corps sont à un niveau d'activité minimum (évaluation objective), alors que Fanger définit le confort de point de vue des éléments sensoriels du confort, pour lui le confort est un état d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement , c'est l'évaluation subjective. Ces études traitent l'effet combiné des paramètres physiques pour connaître les limites de la zone de confort thermique et proposent des indices et de diagrammes bioclimatiques. De nombreux indices sont disponibles pour calculer a priori les sensations thermiques d'un individu en fonction des variables citées précédemment. Les plus connus sont le PMV, et le PPD. Cependant, leur utilisation reste limitée à des ambiances modérées, stationnaires et homogènes c'est-à-dire une proportion infinitésimale des cas rencontrés dans le bâtiment.