الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Equipement de l'habitât

---

# Étude paramétrique du confort thermique dans le bâtiment

---

Présenté par :

**Mr. HABILA ALI BILEL**

**Mme. KHEDIM AHLEM**

Proposé et Dirigé par

**Dr. Z. TRIKI**

**Dr. S. ZEGUAI**

**Promotion 2020**

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions, Dieu Le Tout Puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif.*

*Nous remercions tous nos enseignants qui ont contribué à notre Formation et à notre « enrichissement » en connaissances utiles et importantes durant tous les cycles.*

*Nos vifs remerciements et notre gratitude, s'adressent également à nos promoteurs : Mr. D. TRIKI ZAKARIA et Mr. D. ZEGUAI SALIM qui nous ont dirigé et apporté une grande aide par leurs savoirs, par leurs précieux conseils et leur disponibilité, ce qui nous a permis de réaliser cette étude et ce, malgré les contraintes liées à leurs Charges au niveau de l'Université, qu'ils en soient remerciés.*

*Notre reconnaissance s'adresse également à l'ensemble de nos professeurs du Département de Génie mécanique et de Génie Civil.*

*Nos remerciements s'adressent également à Mr. D. ZIRARI MOUNIR, Mr. D. BENCHICOU MOHAMED, Mr D.CHIBA YOUNES, Mr. D. KHAZRANE, Mr. D. AZZIZOU et Mr. D. REBHI pour nous avoir aidés à réaliser ce travail.*

*Nos vifs remerciements et notre gratitude s'adressent aux honorables Membres du Jury qui nous ont fait l'immense honneur de Présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Nous remercions infiniment nos chers collègues et tous ceux ou celles qui nous ont apporté leur soutien, qu'ils trouvent ici, l'expression de notre fraternelle et amicale reconnaissance.*

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste mémoire de fin d'études de Master*

*A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant les moments les plus pénibles de ce long chemin,*

*A ma mère qui a été à mes côtés et mon père qui s'est sacrifié pour me permettre de devenir ce que je suis,*
*Merci mes parents.*

*A ma femme qui a été à mes côtés et m'a soutenu et encouragé,*
*A ma petite fille ma princesse AFNANE.*

*A mes très chers frères : ZOHEIR, ABDERRAHMANE, ZINEDDINE, ZAKARIA, et mon très cher ami et frère HACID AMINE*

*A toute ma grande famille sans exception.*

*A tous mes amis (es) et les camarades de la promotion de 2 -ème année master génie climatique option équipement de l'habitat.*

*Enfin à tous ceux qui me sont très chers.*

***HABILA ALI BILEL***

# DEDICACE

*Je dédie ce mémoire de fin d'études de Master*

*A ma mère qui m'a soutenu durant toute ma vie, Et à mon père qui n'a ménagé aucun effort pour me permettre de poursuivre mes études,*
*Merci mes parents.*

*A mes très chers frères, sœurs et toute ma famille sans exception.*

*A tous mes amis (es) et camarades de la promotion de 2 -ème année master génie climatique option équipement de l'habitat.*

*Enfin à tous ceux qui me sont très chers.*

***KHEDIM AHLEM***

**Résumé** :

L'enveloppe des bâtiments est conçue pour jouer un rôle de barrière thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. La forme, l'orientation, l'agencement et la composition des éléments constitutifs de l'enveloppe déterminent les caractéristiques de cette barrière. Puisque les ambiances intérieures ne répondent pas toujours aux exigences de confort des occupants, l'environnement intérieur du bâtiment est régulé par des appareils de chauffage, de ventilation et de climatisation. En général, le contrôle du confort thermique dans un bâtiment se limite au maintien d'une température de consigne minimale à respecter pendant la période hivernale et une température qu'il est recommandé de ne pas dépasser pendant la saison chaude.

Ce présent travail, porte sur la modélisation et l'analyse paramétrique du confort thermique au sein des bâtiments en utilisant une approche statistique basée sur certaine grandeurs de satisfaction des individus en question.

**Mots clés :** Confort thermique, bâtiment, modélisation, analyse paramétrique.

**ملخص:**

تم تصميم غلاف المبنى ليكون بمثابة حاجز حراري لإعادة إنشاء مناخ داخلي مستقل عن تقلبات الطقس في الهواء الطلق. يشكل اتجاه وترتيب وتكوين العناصر المكونة للغلاف لتحديد خصائص هذا الحاجز. نظرًا لأن البيئات الداخلية لا تلبي دائمًا متطلبات الراحة للساكنين، فإن البيئة الداخلية للمبنى يتم تنظيمها بواسطة أجهزة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء. بشكل عام، يقتصر التحكم في الراحة الحرارية في المبنى على الحفاظ على الحد الأدنى من درجة الحرارة المحددة التي يجب مراعاتها خلال فترة التسخين ودرجة الحرارة التي يوصى بعدم تجاوزها خلال الموسم الحار.

يركز هذا العمل الحالي على النمذجة والتحليل المعياري للراحة الحرارية في المباني باستخدام نهج إحصائي يعتمد على مستويات رضا معينة للأفراد المعنيين.

**الكلمات المفتاحية:** الراحة الحرارية ، البناء ، النمذجة، التحليل المعياري

**Abstract:**

The building envelope is designed to act as a thermal barrier to recreate an indoor microclimate independent of outdoor weather fluctuations. The shape, orientation, arrangement and composition of the constituent elements of the envelope determine the characteristics of this barrier. Since interior environments do not always meet occupant comfort requirements, the interior environment of the building is regulated by heating, ventilation and air conditioning devices. In general, the control of thermal comfort in a building is limited to maintaining a minimum set point temperature to be observed during the heating period and a temperature that it is recommended not to exceed during the hot season. This present work deals with the modeling and parametric analysis of thermal comfort within buildings using a statistical approach based on certain satisfaction levels of the individuals in question.

**Keywords:** Thermal comfort, building, modeling, parametric analysis.

# Sommaire

**Nomenclature**

**Introduction générale** **01**

**Chapitre I : Généralités sur le confort thermique** **05**

**I. 1 Introduction** **06**

**I. 2 Les aspects de confort thermique** **07**

I. 2.1 L'aspect physiologique : la thermorégulation **07**

I. 2. 2 L'aspect physique **08**

I. 2. 2. 1 Le bilan thermique **08**

I. 2. 2. 2 La charge thermique **10**

I. 2. 2. 3 Les paramètres du confort thermique **11**

I. 2 .2. 3. 1 Confort et température **11**

i/ La température de l'air **11**

ii/ La température des parois ($T_P$) **11**

iii/ La température équivalente $T_{eq}$ **12**

iv/ La température effective $E_T$ **12**

I. 2. 2. 3. 2 Confort et humidité **13**

i/ L'humidité relative de l'air ($H_R$) dans un bâtiment **13**

ii/ La plage de confort température-humidité **14**

iii/ Confort et la vitesse de l'air **15**

I. 2. 2. 3. 3 Le métabolisme **16**

i/ La production de chaleur **16**

I. 2. 2. 3. 4 Les échanges de chaleur **20**

i/ Les échanges de chaleur cutanée **20**

ii/ Les échanges de chaleur sensible **21**

a/ La conduction **21**

b/ La convection **21**

c/ Le rayonnement **23**

I. 2. 2. 3. 5 Effet dû à l'humidité **28**

I. 2. 2. 3. 6 Les échanges de chaleur latente par l'évaporation (due à l'humidité) **29**

I. 2. 2. 3. 7 Les échanges de chaleur par respiration **31**

I. 2. 2. 3. 8 L'influence des vêtements **33**

I. 2. 2. 3. 9 La tenue vestimentaire **35**

I. 2. 2. 3. 10 Résistance thermique vestimentaire **36**

I. 2. 3 L'aspect psychologique : sensation et confort Thermique **38**

I. 2. 3. 1 La sensation thermique **38**

**I. 3 Méthodes actuelles pour atteindre le confort thermique** **39**

I. 3. 1 Modèle de GAGGE **40**

I. 3. 2 Modèle de FANGER: $P_{MV}$-$P_{PD}$ **40**

I. 3. 2. 1 Indices pour atteindre du confort thermique **41**

I. 3. 2. 2 Les indices $P_{MV}$ et $P_{PD}$ **41**

I. 3. 2. 3 Paramètres influant le confort thermique **42**

I. 3. 2. 3. 1 Calcul des indices de confort PMV et PPD **43**

I. 3. 3 Les modèles approfondis **44**

**I. 4 Les inconforts locaux** **45**

I. 4. 1 Effet des courants d'air **46**

I. 4. 2 Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique **46**

I. 4. 3 Effet de gradient thermique vertical de l'air **46**

I. 4. 4. Effet de la température du sol **47**

**I. 5 L'influence des différences interindividuelles** **47**

**I. 6 Diagramme bioclimatique de Givoni** **49**

**Chapitre II - Modélisation du confort thermique** **51**

**II. 1 Introduction** **52**

**II. 2 - Présentation de la région de Médéa** **52**

II. 2. 1 - Situation géographique **52**

II. 2. 2 - Le climat de la ville de Médéa **54**

II. 2. 3 - Données climatiques de la wilaya de Médéa **54**

II. 2. 3. 1 - Les températures et l'humidité **54**

II. 2. 3. 2 - Rayonnement solaire et la durée d'insolation **56**

II. 2. 3. 3 - Les précipitations **57**

II. 2. 3. 4 - Pression de l'air et la vitesse moyenne du vent **58**

II. 2. 3. 5 - Les totaux annuels pour les données climatiques de la wilaya de Médéa **60**

II. 2. 3. 6 - Conclusion de l'analyse climatique **60**

**II. 3 - Présentation du modèle de bâtiment** **61**

II. 3. 1 - Présentation du modèle d'étude **61**

II. 3. 1. 1 - Démarches de conception de l'enveloppe du bâtiment d'un point de vue énergétique et écologique **61**

II. 3. 1. 1. 1 - Conception du bâtiment écologique **62**

II. 3. 1. 1. 1. 1 - Description du modèle **63**

i/ Les plans architecturaux du modèle **64**

II. 3. 1. 1. 2 - Matériaux de construction d'une maison écologique **66**

II. 3. 1. 1. 2. 1 - Composition des parois **67**

II. 3. 1. 1. 2. 2 - Produit utilisé pour la protection et l'entretien des parois en bois **69**

II. 3. 1. 1. 3 - Implantation du bâtiment **70**

II. 3. 1. 1. 4 - Orientation et l'ensoleillement du bâti **71**

i/ Schémas de la frappe des rayons du soleil **72**

II. 3. 1. 1. 5 Organisation de l'espace intérieur **72**

II. 3. 1. 1. 6 Les équipements de confort adopté pour les maisons écologiques **73**

II. 3. 1. 1. 6. 1 Récupération de l'eau de pluie **75**

II. 3. 1. 1. 6. 2 Production d'électricité, chauffage et climatisation **75**

II. 3. 1. 1. 6. 3 - La ventilation **76**

II. 3. 1. 1. 6. 4 - Le reste des équipements **76**

**II. 4 Modèle de FANGER** **77**

**Chapitre III – Analyse paramétrique du confort thermique** **82**

**III. 1 Introduction** **83**

**III. 2 Analyse et étude paramétrique du confort thermique** **83**

III. 2. 1 Application de modèle FANGER (le cas d'une personne à la maison en période d'été) **83**

III. 2. 1. 1 - Les paramètres **83**

III. 2. 2 Analyse des paramètres du confort thermique **86**

III. 2. 2. 1 Effet de la température ambiante ($T_a$) **86**

i/ Calcul de $P_{MV}$/ $P_{PD}$ **86**

ii/Présentation graphique **89**

III. 2. 2. 2 - Effet de température radiante ($T_r$) **89**

i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) **89**

ii/ Présentation graphique **90**

III. 2. 2. 3 - L'effet métabolique (M) **91**

i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) **91**

ii/ Présentation graphique **91**

III. 2. 2. 4 - Effet de la vitesse de l'air ambiant ($V_a$) **92**

i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) **92**

ii/ Présentation graphique **93**

III. 2. 2. 5 Effet de l'isolement vestimentaire ($I_{cl}$) **94**

i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) **94**

ii/ Présentation graphique **94**

III. 2. 2. 6 - L'effet du degré hygrométrique de l'air **95**

i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD)}$ **95**

ii/ Présentation graphique **96**

**Conclusion et recommandations** **97**

**Bibliographie** **99**

**Normes**

**Annexes**

## Liste des tableaux


Tableau I. 1 - Les seuils de bien-être thermique **12**

Tableau I. 2 - Réactions observées en fonction de la vitesse résiduelle de l'air **15**

Tableau I. 3 - Vitesse de l'air et refroidissement équivalent **16**

Tableau I. 4 - Niveaux de détermination du métabolisme énergétique **19**

Tableau I. 5 - Production de chaleur en fonction de l'activité **19**

Tableau I. 6 - Isolement thermique dû aux vêtements **37**

Tableau I.7 - Isolements thermiques intrinsèques d'éléments vestimentaires $l_{cil}$ (En $m^2$. K/W) **38**

Tableau I. 8 - Les échelles de caractérisation de la sensation thermique **39**

Tableau I. 9 : Correspondances entre $P_{MV}$ et échelle des sensations thermiques **41**

Tableau I. 10 - : Zones du confort intérieur du diagramme psychométrique **49**

Tableau II. 1 - Température moyenne quotidienne maximale et minimale, humidité relative **55**

Tableau II. 2 - Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen **56**

Tableau II. 3 - La vitesse et la direction moyenne du vent **59**

Tableau II. 4 - Total annuelles pour les données climatiques de la wilaya de Médéa **60**

Tableau II. 5 - Composition des parois extérieures et intérieures de l'enveloppe **68**

Tableau II. 6 - Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques **77**

Tableau III. 1 – Métabolisme d'une personne à une activité légère, assise **83**

Tableau III. 2 – Tenu vestimentaire légère au mois d'été **84**

Tableau III. 3 - Modèle pour le calcul des indices de confort thermique PMV et PPD en utilisant le logiciel d'Excel **84**

Tableau III. 4 - Les échanges thermiques, bilan globale et équilibre [(M-W)-L]. **84**

Tableau III. 5 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse l'effet de (Ta) sur le confort thermique. **88**

Tableau III. 6 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse d'effet de ($T_r$) sur le confort thermique **89**

Tableau III.7 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse de l'effet de (M) sur le confort thermique. **91**

Tableau III. 8 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse l'effet de (Va) sur le confort thermique. **92**

Tableau III. 9 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse l'effet de ($I_{cl}$) sur le confort thermique. **94**

Tableau III. 10 - Tableau récapitulatif du calcul du modèle de FANGER, analyse l'effet de (HR) sur le confort thermique. **95**

## Liste des figures


Figure I. 1 - Températures corporelles, effets de l'effort et de la chaleur **7**

Figure I. 2 - L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement **8**

Figure I. 3 - Taux d'humidité ambiante optimale **13**

Figure I. 4 - Diagrammes d'humidité **14**

Figure I-5 - Production de chaleur en fonction de l'activité **19**

Figure I. 6 - Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme **20**

Figure I. 7 : Zone de confort en fonction de la température opératoire et de l'humidité **27**

Figure I. 8 - Isolation typique des vêtements selon la température extérieure à 6 **34**

Figure I. 9 - Les modèles simples du comportement thermique des vêtements **35**

Figure 1.10 - : Correspondances entre $P_{MV}$ et $P_{PD}$ **42**

Figure I. 11 - Schématisation du modèle thermique de Stolwijk **45**

Figure I. 12 - Diagramme psychrométrique adapté de Givoni **50**

Figure II. 1 - Situation de la ville de Médéa **52**

Figure II. 2 - Situation de la wilaya de Médéa **53**

Figure II. 3 - Carte routière Algérie **53**

Figure II. 4 - Valeur des températures moyennes mensuelles, pour la période de 2019 **54**

Figure II. 5 - Durée mensuelle d'insolation à Médéa **56**

Figure II. 6 - Carte des précipitations du Nord de l'Algérie **57**

Figure II. 7 - Valeur des précipitations moyennes mensuelles de 2019 **58**

Figure II. 8 - Pression de l'air et vitesse du vent mensuelle **58**

Figure II. 9 - Situation du bâtiment de cas d'étude dans son contexte immédiat **61**

Figure II. 10 - Construction d'une maison par ossature en bois **64**

Figure II. 11 - Vue en plan du sous-sol, **64**

Figure II. 12 - Vue en plan du rez-de-chaussée RDC, **65**

Figure II. 13 - Vue en plan du 1er étage **66**

Figure II. 14 - Isolant fibre en bois en panneaux **67**

Figure II. 15 - Soufflage isolant fibre en bois dans la toiture perdue **67**

Figure II. 16 - Mur de fondation et du plancher du sous-sol (dalle de béton) **69**

Figure II. 17 - Implantation du bâtiment et schéma d'intégration de l'habitat dans le paysage **70**

Figure II. 18 - Orientation du bâti **71**

Figure II. 19 -Schéma de la frappe des rayons du soleil, en été et en hiver et l'orientation du bâti,**72**

Figure II. 20 - Orientation des pièces de la maison. **73**

Figure II. 21 - Les équipements de confort adopté pour les maisons écologiques **74**
Figure II. 22 - Production d'électricité et de l'air chaud par les panneaux aérovoltaïque et le principe du puits canadien **76**
Figure II. 23 - Correspondances entre PMV et PPD **78**
Figure III. 1 - Pourcentage des échanges thermiques **85**
Figure III. 2 Les charges thermiques . **85**
Figure III. 3 - Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) en fonction du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$)_ **85**
Figure III. 4 - Variation de PMV et PPD en fonction de la Température ambiante (Ta) **89**
Figure III. 5 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de la Température radiante ($T_r$) **90**
Figure III.6 - Variation de $_{PMV}$ et $P_{PD}$ en fonction du métabolisme (M) **92**
Figure III. 7 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de la vitesse de l'air ambiant ($V_a$) **93**
Figure III. 8 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de l'isolement vestimentaire ($I_{cl}$) **95**
Figure III. 9 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de l'hygrométrie de l'air ambiant ($H_R$) **96**

# Nomenclature

## *Symboles*

$A_c$ = Surface cutanée participant aux échanges thermiques convectifs $m^2$
$A_D$ = Surface de Dubois, surface cutanée totale $m^2$
$A_{d,cl}$ = Surface corporelle de l'homme vêtu $m^2$
$A_e$ = Surface cutanée qui évapore parce qu'elle est mouillée $m^2$
$A_r$ = Surface cutanée participant aux échanges thermiques radiatifs $m^2$

C = Flux de chaleur échangé par convection, [W/m²]
C = à la surface de peau
$C_{res}$ = par convection respiratoire [W/m²]
$C_p$ =Chaleur spécifique, [kJ/kg.K]
$C_{p,b}$ = chaleur spécifique du corps [3.49 kJ/kg.K]
$C_{P,cr}$ = chaleur spécifique du noyau corporel [3.49 kJ/kg.K]
$C_{p,sk}$ = chaleur spécifique de la peau [3.49 kJ/Kg.K]
$C_{p,bl}$ = chaleur spécifique du sang [4.19 kJ/Kg.K]

DISC = Indice d'inconfort thermique, [1]
DR = Gêne par courant d'air, [%]

E = Flux de chaleur latente échangé par évaporation, [W/m²]
$E_{dif}$= par diffusion à travers la peau [W/m²]
$E_{max}$ = maximum possible [W/m²]
$E_{res}$= par évaporation respiratoire [W/m²]
$E_{sw}$= due à la sudation régulatrice [W/m²]
$E_{res,req}$= requis pour le confort [W/m²]
$E_{sk}$= totale à la surface de la peau [W/m²]
$f_{cl}$ = Facteur d'habillement, [1]
$f_{eff}$ = Facteur effectif de surface rayonnante [1]

h = Coefficient d'échange de chaleur sensible, W/m².K
h = Totale à la surface
$h_c$ = Par convection à la surface [W/m² .k]
$h_r$ = Par rayonnement à la surface [W/m².k]
he = Coefficient d'échange de chaleur par évaporation, [W/m².k]

$H_R$ = Humidité relative, [%]

i = Indice de perméabilité à la vapeur d'eau, [1]
$i_a$ = Couche d'air
$i_{cl}$ = Vêtment
$i_m$ = Total

I = Isolement thermique, [clo]
$I_a$ = De la couche d'air à la surface cutanée nue, [clo]
$I_{a,cl}$ = De la couche d'air à la surface des vêtements, [clo]
$I_{cl}$ = Des vêtements , [clo]
$I_{cls}$ = Des vêtements standard pour une activité donnée, [clo]
$I_t$ = Total, [clo]

| | | |
|---|---|---|
| L | = | L'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue, W/m² |
| L" | = | Charge thermique, [W /m²] |
| K | = | Flux de chaleur échangé par conduction, [W/m²] |
| k | = | Conductivité tissulaire, [W/m².K] [5.28 W/m².K] |
| M | = | Production de chaleur interne (taux de métabolisme), [W/m²] ou [Met] |
| | | $M_B$=Métabolisme basal [W/m².K] |
| | | $M_p$=Composante posturale [W/m².K] |
| | | $M_W$=Composante d'activité [W/m².K] |
| | | $M_M$= Composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse, [W/m².K] |
| | | M $s_{hiv}$= Production de chaleur interne par frisson, [W/m².K] |
| $M_{O2}$ | = | Consommation d'oxygène, (L . $min^{-1}$) |
| $M_{CO}$ | = | Production de dioxyde de carbone, (L . $min^{-1}$) |
| $M_{air}$ | = | Ventilation pulmonaire, [kg/s] |
| nsc | = | Efficacité de sudation, [%] |
| $m_{bl}$ | = | Débit sanguin périphérique, [kg/s.m²] |
| $m_{sw}$ | = | Débit de sudation régulatrice générée, [kg/s.m²] |
| p | = | Pression de vapeur d'eau, [kPa] |
| | | $p_a$ = Dans l'air ambiant, [kPa] |
| | | $p_{exp}$= Dans l'air expiré [kPa] |
| | | $P_{aH2O}$ = Pression partielle de vapeur d'eau ambiante, [kPa] |
| | | $p_{sk,s}$ = Saturée à $t_{sk,}$ [kPa] |
| PMV | = | Vote moyen prévisible, [1] |
| PMV* | = | Vote moyen prévisible calculé à partir de ET*, [1] |
| PPD | = | Pourcentage des personnes insatisfaites, % |
| Q | = | Flux de chaleur échangé par le corps humain, [W/m²] |
| | | $Q_{res}$ =Flux de chaleur échangé par voie respiratoire,[W/m²] |
| | | $Q_{sk}$ =Flux de chaleur échangé à la surface cutanée, [W/m²] |
| | | $Q_{dry}$ =Flux de chaleur sensible échangé à la surface cutanée, [W/m²] |
| | | $Q_{evap}$ =Flux de chaleur latente échangé à la surface cutanée, [W/m²] |
| $Q_R$= | | Quotient respiratoire, le rapport entre Vco2 et Vo2 (QR est compris entre 0,83 au repos et |
| | | 1,00 lors d'u travail très intense) |
| R | = | Flux de chaleur échangé par rayonnement, [W/m²] |
| $R_e$ | = | Résistance à l'évaporation, [m².kPa/W] |
| | | $R_{e,cl}$ = Vêtement, [m².kPa/W] |
| | | $R_{e,t}$ = Total, [m².kPa/W] |
| S | = | Taux de chaleur stocké, [W/m²] |
| | | $S_{cr}$= Taux de chaleur stocké à l'intérieur du corps, [W/m²] |
| | | $S_{sk}$= Taux de chaleur dans la peau, [W/m²] |
| | | $SW_{req}$ = Débit sudoral requis |
| | | $SW_p$ = Prédit |
| T | = | Température, [°C] |
| | | T = Température absolue, [K] |

ET* =Température effective, [°C]
SET = Température effective standard, [°C]
$t_a$ = Température air ambiant, [°C]
$t_b$ = Température moyenne du corps, [°C]
$t_{cl}$ = Température à la surface externe du vêtement, [°C]
$t_{conf}$ = Température de confort, [°C]
$t_{cr}$ = Température interne (corps), [°C]
texp = Température air expiré, [°C]
$t_{ext}$ = Température air ambiant extérieur, [°C]
$t_{ext,j}$ = Température moyenne journalière, [°C]
tg = Température de globe noir, [°C]
$t_{tmrt}$ = moyenne de rayonnement, [°C]
$t_{neut}$ = Température de neutralité thermique, [°C]
$t_{rm}$ = moyenne mobile exponentielle, [°C]
$t_o$ = Température opérative, [°C]
$t_{sk}$ = Température cutanée, [°C]
$t_{sk,req}$ = Température requise pour le confort, [°C]

$T_{SEN\ S}$ = Indice de sensation thermique, [1]

$V_{ar}$ = Vitesse de l'air résultant du climat et des mouvements à l'intérieur de ce climat, [m/s]
Va = Vitesse de l'air, [m/s ]

W = Energie utilisée par le travail externe, [W/m²]
W cr = Masse du noyau corporel, [kg]
Wsk = Masse de la peau, [kg]
$W_{req}$ = La mouillure cutanée requise
$W_{ex}$ = Humidité spécifique (contenu en eau) de l'air expiré, [kg eau / kg air sec]
w = Humidité spécifique de l'air ambiant, [kg eau / kg air sec]
a = Fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau, [1]
s = Constante de Stefan-Boltzmann, [W/m².K4 ]
$\mathcal{E}$ = Emissivité, [1]
ρ = Densité, [kg/m3]
θ = Temps, [s]
ω = Mouillure cutanée, [1]

## *Abbreviations*

ACGIH =American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AFNOR =Association Française de Normalisation
ANRH = Agence Nationale des Ressources Hydrauliques en Algérie.
ASHRAE =American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
C.T.A =Centrale de traitement de l'air
ISO =International Organization for Standardization
PMV =Vote moyen prévisible (predict mean vote)
PPD =Pourcentage des personnes insatisfaites, % (Predicted Percentage Dissatisfied)
PSH =Indice « Predicted Heat Strain »
WBGT =Indice «Wet Bulb Globe Temperature»
WCI =wind chill index

# Introduction générale

De tout temps, l'homme s'est intéressé au confort thermique dans son habitat. Déjà au cours des âges préhistoriques, les hommes trouvaient refuge et confort dans des grottes qu'ils aménageaient au fur et à mesure pour atténuer quelque peu les rigueurs du froid, de la pluie, de la neige et de la chaleur. Dans les régions froides du nord notamment en Alaska, les hommes construisaient des « huttes » à partir de la glace en place, qu'ils nommaient « Igloo » et qui les protégeaient du froid intense et implacable de ces régions.

Chez nous et notamment dans les zones très chaudes (Adrar, Tindouf, Ain Salah, Ghardaïa, etc….) les hommes prévoyaient soit :

- Une cave aménagée en dessous de leurs habitations pour trouver un confort thermique relatif (la température à l'intérieur de ces caves d'environ 28°C est stable et ce, quelle que soit la saison).
- Des aménagements architecturaux tels que : l'orientation du bâtiment, le système de ventilation naturelle, le regroupement des maisons type casbah, etc…tout en utilisant des matériaux locaux comme le « timchent » (mélange d'argile, de limons, de la paille et des branchages pris du dattier).

Il est vrai que la perception du confort thermique varie d'un individu à un autre et d'une communauté à une autre selon la localisation géographique des uns et des autres. En effet, les habitants des régions froides cherchent à trouver des solutions pour isoler leurs maisons du froid glacial. Par contre les habitants des régions chaudes et sèches (comme le Sahara) leur souci majeur est celui d'isoler leurs bâtiments de la chaleur et de les rendre plus frais.

De nos jours, le confort thermique pend une place importante dans tout projet de construction de bâtiment. Même la problématique de « la facture énergétique » est prise en considération de manière plus marquée et plus intense. Aussi, il apparait de plus en plus évident que ce qui différencie la situation où se trouve l'architecture moderne vis-à-vis de l'architecture de n'importe quelle ancienne époque au niveau des questions énergétiques est non seulement la diminution de la disponibilité des ressources énergétiques mais également l'exigence d'un confort thermique devenu essentiel depuis le XIXe siècle (Campajola, 1989).

La période 1946-1975 a été une période marquante pour l'essor du confort thermique dans les bâtiments, période durant laquelle certains freins et autres obstacles à l'extension du confort vont être levés, lui permettant de devenir un véritable enjeu, tant économique que social. Le développement des techniques a joué un rôle très important pour améliorer le confort. Cette période est caractérisée par l'essor et le développement des machines thermiques (Collard, 2001). Le confort thermique, dans des espaces de vie et de travail, constitue une demande reconnue et justifiée, à laquelle le concepteur doit apporter des solutions durables afin d'éviter toute opération de réhabilitation thermique prématurée.

Les Sensations thermiques sont différentes entre les gens, même dans le même environnement. Même si les capteurs rendent le même résultat quelle que soit la position géographique où une voie de mesure est prise, ce n'est pas le cas pour les personnes. En effet, les personnes résidantes dans des espaces très similaires, soumis au même climat et appartenant à une culture commune, émettent des avis très différents sur le confort thermique ; ceci est dû à la combinaison d'un grand nombre de facteurs qui influent sur la perception des êtres humains.

Partant de là, le diagnostic s'avère être un outil indispensable pour parvenir à un ensemble d'évaluation des paramètres de l'étude. Classiquement, l'inconfort thermique est considéré comme une condition subjective tandis que la sensation thermique est une sensation objective.

La Satisfaction à l'égard de l'environnement thermique est une réponse complexe subjective à plusieurs interactions et à des variables moins tangibles. En d'autres termes, il n'y a vraiment pas de norme absolue pour le confort thermique. En général, le confort se produit lorsque la température du corps est conservée dans une gamme étroite, l'humidité cutanée est faible et l'effort physiologique de la régulation est minimisé. Le confort dépend aussi du comportement des actions telles que l'habillement, l'activité, le changement de la posture ou l'emplacement, l'ouverture d'une fenêtre ou d'une plainte.

En 1962, Macpherson a défini six facteurs affectant la sensation thermique, il s'agit de quatre variables physiques (température de l'air, vitesse de l'air, humidité relative, la température radiante moyenne) et de deux variables personnels (isolation des vêtements et le niveau d'activité, c'est à dire le taux de métabolisme.

Actuellement, le confort thermique constitue une demande reconnue et justifiée dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant passant les trois quarts de son temps à l'intérieur. Cette demande est soutenue par des normes et des règlementations qui permettent d'assurer la conformité des ambiances intérieures par rapport aux exigences du confort thermique. Or, la recherche des ambiances thermiques intérieures uniformes et confortables, conformément aux normes, tout au long de l'année et sans tenir compte des particularités du climat, du site, des bâtiments, etc.… est accompagnée par une multiplication des installations climatiques, entraînant ainsi de fortes consommations d'énergie, d'origine fossile essentiellement, épuisable et polluante.

La prise de conscience de l'épuisement des ressources énergétiques, l'augmentation des prix des énergies fossiles et les effets du réchauffement climatique ont engendré un intérêt pour la maitrise des consommations énergétiques en général et celles liées à l'énergie dans le bâtiment en particulier.

Le secteur du bâtiment consomme environ 40% de l'énergie mondiale et compte pour environ 1/3 des émissions des gaz à effet de serre dans le monde. Les bâtiments des secteurs résidentiels et tertiaires consomment environ 60% de l'électricité mondiale.

En Algérie, un grand nombre de logements ne semblent pas répondre aux exigences du confort thermique et d'économie d'énergie. L'enveloppe, la forme et les matériaux de construction se libèrent des données du site et sont souvent en contradiction avec les exigences du milieu naturel, créant ainsi un inconfort et un déséquilibre entre, l'élément construit et l'environnement ambiant. Cela s'explique par l'absence d'une réglementation spécifique d'une part, par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les maîtres d'ouvrage.

La maîtrise des éléments passifs et l'amélioration des techniques (au niveau des matériaux de construction et d'isolation thermique), l'orientation des façades, les ouvertures, la compacité de l'édifice et l'utilisation d'un vitrage, à hautes performances thermiques, permettent aujourd'hui de réaliser des bâtiments qui rassemblent à la fois les qualités esthétiques et thermiques. Tout en offrant un cadre de vie plus confortable, en étant peu consommateur d'énergie, ces types de bâtiments minimisent les déperditions et bénéficient des gains thermiques dont souffrent les édifices à caractère public.

Les contextes urbain et énergétique représentent des opportunités pour la démarche écologique et l'efficacité énergétique tant dans la conception que dans la rénovation. Construire durablement entraînera un environnement plus sain et plus productif. L'adaptation des constructions au contexte climatique de notre pays notamment aride et semi-aride est une nécessité si l'on veut améliorer les conditions de vie dans l'habitat et diminuer les risques qui pèsent sur l'état de santé et la productivité des occupants du fait de l'inconfort thermique dans les bâtiments et ceux en évolution libre en particulier. Cette adaptation passe par une meilleure connaissance des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses composants. Cela exige le recours aux modèles numériques basés principalement sur des modèles mathématiques développés par FANGER à partir des expériences particulières de chambre à température contrôlée, aux outils de simulation qui constituent des moyens raisonnables, en termes de délai et de réduction au minimum du coût d'énergie employée. Ceci afin de pouvoir analyser et comprendre le comportement des bâtiments et en améliorer les performances énergétiques et thermique que ce soit en phase de conception ou de vie capables de répondre aux critères de conductivité et d'inertie thermique.

L'objectif de ce travail est la modélisation et l'analyse paramétrique du confort thermique et ce, en vue de contribuer au développement d'un modèle de calcul en utilisant le logiciel « Excel » pour le traitement des résultats de la simulation ; ce qui doit permettre d'estimer les seuils de confort à partir du modèle de FANGER afin d'analyser et étudier l'effet des différents paramètres pouvant influencer le confort thermique de l'être humain dans les bâtiments.

Ainsi, après avoir présenté la problématique posée par ce présent travail, nous donnerons dans le premier chapitre des généralités sur le confort thermique et le bilan énergétique de l'être humain dans ses échanges avec l'environnement. Le deuxième chapitre aborde le volet modélisation, les principaux problèmes et les importances de l'effet du confort thermique dans le bâtiment, pour se faire nous avons choisis comme modèle d'étude, une maison écologique pilote virtuelle située dans la commune de Benchicao.

Le troisième chapitre traite de l'analyse paramétrique, de l'influence des six paramètres sur le confort, la sensation thermique dans les bâtiments et des occupants et du modèle à développer pour simuler en utilisant le logiciel « Excel » pour le traitement des résultats de la simulation. Sur la base du célèbre modèle de FANGER, les résultats obtenus sont discutés et commentés. Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale et des recommandations.

# CHAPITRE N°I :

# GÉNÉRALITÉS SUR LE CONFORT THERMIQUE

## I. 1 Introduction

Le confort est une notion essentiellement subjective. Il peut être défini de diverses manières :

- ✓ Absence de plaintes pour inconfort.
- ✓ Sensation de bien-être général.
- ✓ Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau minimum d'activité.

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. Une meilleure prise en compte du confort thermique dès la conception d'un projet de construction d'un bâtiment augmenterait la précision des prévisions de consommation énergétique (Vorger, 2014). Ceci nécessite une meilleure compréhension du phénomène de confort thermique en ce sens que, le corps humain interagit avec son environnement à travers des échanges de chaleur (latente et sensible) et régule sa température par « des processus thermo-physiologiques involontaires qui modulent la production et le transfert de masse et de chaleur, internes et externes» (Thellier et al., 2009).

Selon (Lavigne.P 1998), 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 coté subjectif des usagers qui place la perception de chaque individu au cœur de l'analyse. La production de la sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable. Aucune partie du corps ne doit être trop chaude ni trop froide (inconfort local). Si le confort thermique est souhaitable, il est souvent difficile de l'obtenir dans plusieurs milieux de travail. Toutefois, des conditions thermiques inconfortables ne présentent pas nécessairement un risque pour la santé ou la sécurité des travailleurs puisque l'organisme peut s'adapter dans une certaine mesure aux fluctuations de l'ambiance.[1]

Les principaux facteurs qui régissent les échanges de chaleur entre une personne et son environnement et qui ont une incidence sur son confort thermique sont les suivants :

- ➢ Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
- ➢ L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
- ➢ La température ambiante de l'air $T_a$.
- ➢ La température moyenne des parois $T_p$.

[1] *Confort : Le Dictionnaire "Petit Robert" : Confort n.m. Tout ce qui contribue au bien-être, à la commodité de la vie matérielle.*

- L'humidité relative de l'air ($H_r$), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température Ta et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.
- La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s (Cherghui Mohamed Amine, 2012).

L'objectif de ce chapitre est de définir le concept de confort thermique et sa relation avec le paramètre de l'environnement, les différents types d'échanges thermiques qui existent dans un corps humain et son environnement, nous montrons également les différents types d'indices de confort thermique et enfin comment appliquer le modèle de FANGER.

## I. 2 Les aspects de confort thermique

### I. 2.1 L'aspect physiologique : la thermorégulation

Le maintien de la vie au niveau cellulaire, le fonctionnement des différents organes et l'activité musculaire nécessitent une dépense énergétique permanente, le métabolisme. Cette énergie dégagée essentiellement sous forme de chaleur se propage de l'intérieur vers l'extérieur de l'organisme, véhiculé par la conduction tissulaire et surtout par la convection sanguine. La répartition énergétique et les coefficients locaux d'échange de chaleur font que, globalement, le noyau central est à une température de l'ordre de 37 °C, alors que la surface périphérique (la peau) est comprise entre 29-30 °C et 34-35 °C au niveau des pieds et de la tête. Ces températures sont susceptibles de varier, au quotidien, en réponse à des perturbations internes et externes (ASHRAE, 1997). Le schéma de la figure I.1 rend compte des températures au repos à la thermo-neutralité (Candas, 1998).

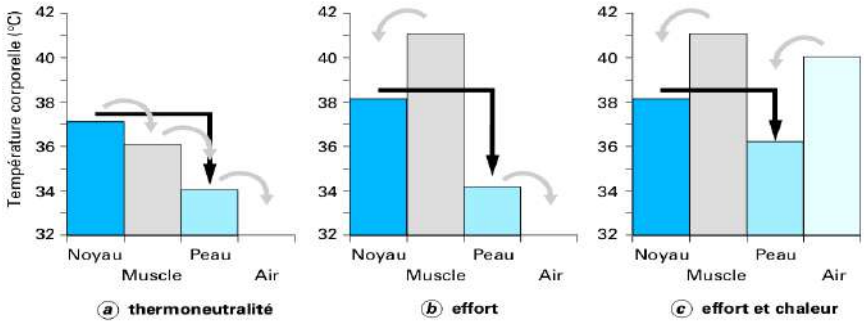



Figure I. 1 - Températures corporelles, effets de l'effort et de la chaleur (Candas, 1998)

La température interne varie essentiellement en fonction de l'activité de l'individu. Les déplacements et les activités musculaires dégagent de la chaleur dans les muscles ; cette chaleur est véhiculée par le sang, elle est donc distribuée centralement ce qui va engendrer une modification de la température interne. La température externe n'est pas affectée par l'activité métabolique ; elle dépend exclusivement des variations des paramètres extérieurs (température de l'air ou du rayonnement, vitesse de l'air, vêtements).

L'homme étant homéotherme (ASHRAE, 1997), il dispose d'un système dynamique de thermorégulation qui permet de contrôler et réguler les échanges de chaleur interne et externe du corps humain, dit système régulé passif, afin de maintenir les températures du corps à leurs valeurs de consigne (Parsons, 2003).

### I. 2. 2 L'aspect physique

L'approche physique du confort thermique représente l'homme comme une machine thermique et considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur. Le maintien de la température interne du corps humain autour de 37°C nécessite un équilibre thermique avec son environnement. Pour cela, la chaleur produite à l'intérieur du corps humain et véhiculée à sa surface cutanée doit être compensée par des déperditions de chaleur dans l'environnement. Les fluctuations dans les conditions externes et internes impliquent un état d'équilibre dynamique, l'homéostasie (Jacques Teller, 1985). Si la chaleur produite dans le corps dépasse celle perdue à l'environnement, le corps se réchauffe et sa température interne s'élève et dans le cas inverse il se refroidit avec un abaissement de sa température interne.

#### I. 2. 2. 1 Le bilan thermique

La chaleur métabolique produite dans le corps humain peut être stockée dans celui-ci, induisant une élévation de la température interne, ou dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire (Figure I.2)

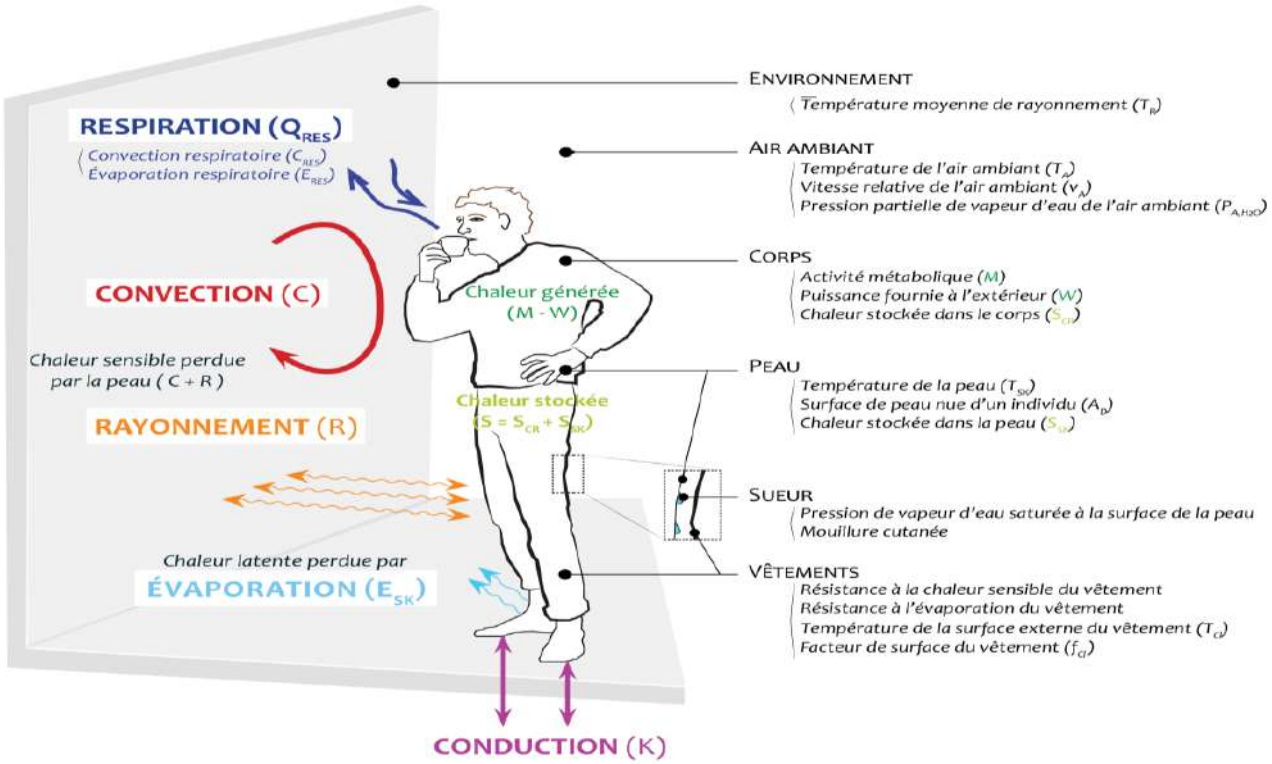



Figure I. 2 - L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement (Bassam Moujalled, 2007).

Le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante :(ASHRAE,1997).

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S$$
$$= (C + R + K + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{sk} + S_c$$

(I.1)

**Avec :**

M taux du métabolisme [W/m²].

W travail externe [W/m²].

$Q_{res}$ flux de chaleur échangé par voie respiratoire [W/m²].

$Q_{sk}$ flux de chaleur échangé à la surface cutanée [W/m²].

$C_{res}$ flux de chaleur échangé par convection respiratoire [W/m²].

$E_{res}$ flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire [W/m²].

C flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau [W/m²].

R flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau [W/m²].

K flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau, [W/m²].

$E_{sk}$ flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau [W/m²].

$S_{cr}$ taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps [W/m²].

$S_{sk}$ taux de chaleur stockée dans la peau [W/m²].

Tant que le bilan thermique est nul, l'homéothermie est assurée. Lorsqu'il est différent de 0, les températures corporelles (cutanée et centrale) diminuent (S < 0) ou augmente (S > 0). Ces variations de températures corporelles entrainent à leur tour une mise en jeu des mécanismes de lutte contre le chaud ou le froid.

La chaleur produite par le corps est dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée, la chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente).

Les flux de chaleur à la surface de la peau sont exprimés en fonction des variables de l'environnement thermique, de la température cutanée et de la mouillure cutanée. Ils sont souvent calculés par unité de surface corporelle (elle est prise égale à 1,8 m² pour une personne standard (Dr R.Cantin, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino, 2005). Les variables de l'environnement thermique sont la température d'air, la température de rayonnement, la vitesse de l'air et l'humidité relative.

L'individu est caractérisé par deux variables personnelles : l'activité et la vêture. La vêture est représentée par l'isolation thermique et la perméabilité à la vapeur des vêtements.

La chaleur stockée dans le corps peut être déterminé à partir du taux d'augmentation de l'énergie interne. Elle est exprimée en fonction de la capacité thermique et le taux de changement de la température dans le temps (Thellier, 1989).

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha)mc_{p.b}}{A_D}\frac{dt_{cr}}{d\theta}$$
$$S_{ck} = \frac{mc_{p.b}}{A_D}\frac{dt_{sk}}{d\theta} \qquad \text{(I.2)}$$

Avec :

A fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau [1].

m masse corporelle [kg].

$c_{p,b}$ chaleur spécifique du corps [kJ/kg.K].

θ temps [s].

### I. 2. 2. 2 La charge thermique

On peut définir la charge thermique (L") appliquée au corps humain par un simple bilan:

$$L'' = (Q'')_{\text{à dissiper}} - (Q'')_{\text{dissipable}} \qquad \text{(I. 3)}$$

Où Q" flux de chaleur à dissiper est fonction de l'activité, en condition confortable et Q" dissipable dépend des échanges thermiques à la surface de la peau en conditions confortables.

L" mesure l'état de déséquilibre thermique du corps humain en figeant la thermorégulation comme si l'ambiance était confortable. En fait, on sait que si L" est différent de 0, il y aura une correction thermorégulatrice, mais que celle-ci s'accompagne d'un certain risque d'inconfort. C'est ce risque que nous tenterons d'évaluer. (Berkouk Djihed, 2017)

### I. 2. 2. 3 Les paramètres du confort thermique

Les paramètres de confort thermique dans le bâtiment sont :

#### I. 2 .2. 3. 1 Confort et température

**i/ La température de l'air**

Elle 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 de l'air, l'humidité. 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. Cependant, sous des conditions à faible humidité et à une vitesse de l'air élevée, la peau peut rester sèche même à des fortes températures (malgré l'augmentation de la sueur). La température de l'air ambiant ou température sèche est mesurée par un thermomètre à bulbe sec (thermomètre doit être aplati pour éviter l'influence du rayonnement), l'intervalle de confort va généralement de 18 à 25 C°.

**ii/ La température des parois ($T_P$)**

Moins de 4 C° 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) (Bruant, 1997). Cette dernière se détermine selon l'équation suivante :

$$T_{op} = \alpha . T_a + (1 - \alpha) T_{mrt}$$

$$T_{op} = T_{rs} = (T_a + T_p)/2 \qquad (1.4)$$

**Avec :**

**$T_a$** température d'air, [°C].

**$T_{mrt}$** température moyenne radiante, [°C].

**$\alpha$** paramètre dépendant exclusivement de la vitesse de l'air (souvent voisine de 0,5)

Cet indice (a) est pris égal à la température mesurée à l'intérieur d'un globe noir dont le diamètre est déterminé de façon que les échanges de chaleur par convection et rayonnement soient dans les mêmes proportions que pour le corps humain. Pour une convection naturelle avec une vitesse d'air faible (entre 0.1 et 0.15 m/s), un globe de 40 mm de diamètre est suffisant. Il a en plus un temps de réponse plus rapide par rapport au globe de 150 mm traditionnellement utilisé (Parsons, 2003). Une balle de tennis est parfois utilisée (38 mm de diamètre), elle représente ainsi un modèle physique simple du corps humain (Nicol, 2001).

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

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

Tableau I. 1 - Les seuils de bien-être thermique, (Guide technique de la diffusion d'air, 2006)

### iii/ La température équivalente $T_{eq}$

La température équivalente est définie comme étant la température d'une enceinte isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de prendre en compte les effets des températures de l'air, du rayonnement et de la vitesse d'air **($T_a$, $T_r$ et $V_a$)**. Elle peut être calculée à partir de la température à l'intérieur d'un globe chauffé.

### iv/ La température effective $E_T$

La température effective est définie comme étant la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à **50 %** d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait même une mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. L'indice $E_T$ prend en compte les effets de la température et de l'humidité (**$T_a$, $T_r$**, et **$P_a$**). Pour le calculer, il faut connaître la mouillure cutanée et l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau des vêtements **($i_m$)**. L'ASHRAE (Bassam MOUJALLED, 2007) a établi des échelles de confort basées sur cet indice pour des sujets exerçant une activité faible (**1 $M_{et}$**), ayant une vêture de **0,6 $C_{lo}$** et dans une ambiance calme (**$V_a$ < 0,2 m/s**).

### I. 2. 2. 3. 2 Confort et humidité

#### i/ L'humidité relative de l'air ($H_R$) dans un bâtiment

L'humidité relative ($H_R$) 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 ». L'humidité détermine la capacité évaporatoire de l'air et 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'arrive pas à évaporer toute la sueur, une couche liquide se forme sur la peau (peau humidifiée).

L'humidité à relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans son bureau (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

La réaction physiologique et sensorielle due à l'humidité est relevée lorsque la vitesse de l'air augmente. Entre 30 % et 70 % elle pèse peu sur la sensation du confort thermique.

Le diagramme ci-dessous, précise la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique (d'après Scofield et Sterling) (Doc.Dri-Steem/Pacare) (Jedidi, Malek. Benjedou, OMRANE, 2016).

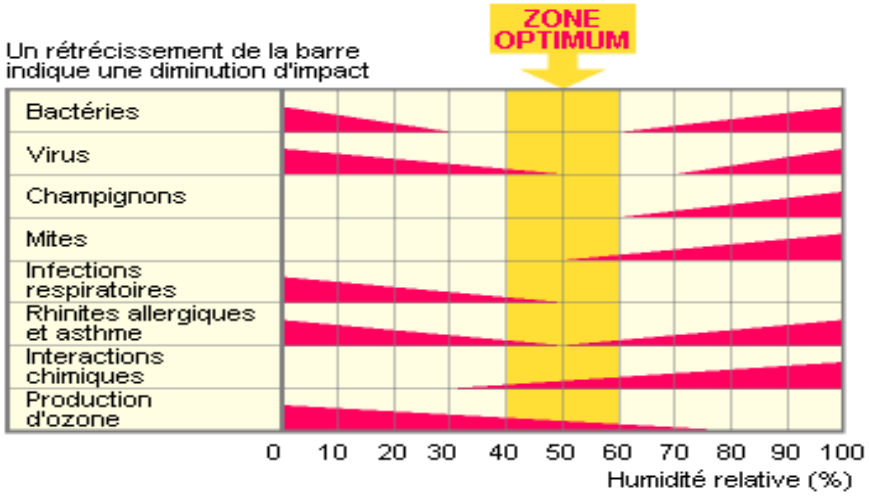



Figure I. 3 - Taux d'humidité ambiante optimale (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

Un air sec permettant à certains microbes de se conserver en sporulant, augmente le risque d'infections et d'allergies (poussières, pollens) et la concentration d'ozone.

Une humidité trop élevée favorise le développement des microbes, des acariens, les réactions chimiques et les allergies aux composés chimiques.

L'humidité relative à peu d'effet sur le sentiment de confort thermique, pour autant qu'elle se situe entre 30 et 70 % et que la température soit confortable. Un air frais et sec est mieux perçu qu'un air chaud et humide, ce qui permet de sérieuses économies : en abaissant la température et l'humidité de 23°C et 50% à 20°C et 40% on peut diminuer le débit d'air par personne de 10 à 3,5 l/s (36 à 13 $m^3$/h) sans que les occupants jugent que la qualité de l'air diminue (Bassam MOUJALLED, 2007).

### ii/ La plage de confort température-humidité

Pour un confort thermique optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65 %.

Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant (extrait de l'article de R. Fauconnier : « L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires » parut dans le numéro 10/1992 de la revue Chauffage Ventilation Conditionnement) (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

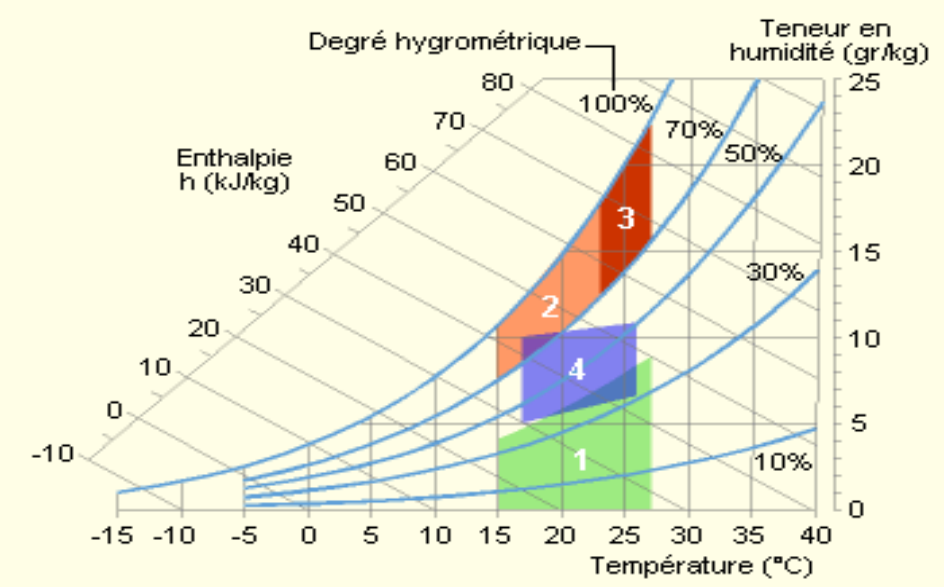



Figure I. 4 - Diagrammes d'humidité (CHERGUI Mohamed Amine 2012)

**Légende :**

**Zone 1 :** à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.

**Zone 2 et 3 :** à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.

**Zone 3 :** à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.

**Zone 4 :** polygone de confort hygrothermique.

A noter enfin que les limites d'humidité imposées en Suisse par la SIA V382/1 (JEDIDI, Malek. BENJEDDOU, OMRANE, 2016) sont beaucoup moins exigeantes : on admet une humidité située en permanence entre 30 et 65 % $H_R$, avec des pointes entre 20 et 75 % $H_R$ durant quelques jours par an. De tels taux momentanés sont supportables physiologiquement, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à une humidification artificielle.

Pour plus d'informations sur l'impact du taux d'humidité sur la santé, on consultera l'ouvrage Manuel de l'humidification de l'air (https://energieplus-lesite.be/).

### iii/ Confort et la vitesse de l'air

La vitesse de l'air influence les échanges convectifs et évaporatifs, à l'intérieur des bâtiments, elle demeure limitée et ne dépasse pas 0,20m/s. Toutefois, elle est responsable de l'apparition de gêne chez l'occupant, liée à la présence de courants d'air froids ou chauds. Le mouvement de l'air abaisse la température du corps humain, facteur recherché en été, mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air).

Le tableau I. 2 illustre les réactions observées en fonction de la vitesse résiduelle de l'air pour plusieurs situations possibles (CHERGUI Mohamed Amine 2012) :

| Vitesses résiduelles | Réactions | Situation |
|---|---|---|
| 0 à 0,08 m/s | Plaintes quant à la stagnation de l'air. | Aucune. |
| 0,13 m/s | Situation idéale. | Installation de grand confort. |
| 0,13 à 0,25 m/s | Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence. | Installation de confort. |
| 0,33 m/s | Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux. | Grandes surfaces et magasins. |
| 0,38 m/s | Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement. | Grandes surfaces et magasins. |
| 0,38 à 0,5 m/s | Sensation de déplacement d'air important. | Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement. |

Tableau I. 2 - Réactions observées en fonction de la vitesse résiduelle de l'air (CHERGUI Mohamed Amine 2012).

La fourniture d'air frais pour la ventilation d'un local n'entraîne en principe qu'un mouvement très faible de l'air. Le confort est donc directement lié à la qualité de la diffusion de l'air dans la pièce, afin d'assurer une vitesse réelle inférieure à 0,25 m/s au droit des occupants. Pour les températures de locaux comprises entre 21 et 24°C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités. Mais lorsqu'on fournit un travail musculaire dans des endroits chauds, des vitesses d'air de 1,25 à 2,5 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement.

On produit parfois des vitesses plus élevées lorsque des hommes sont soumis pour de courtes périodes à une chaleur rayonnante intense. Ce mouvement d'air sera obtenu à l'aide de ventilateurs. L'effet rafraîchissant est ressenti peut-être exprimé en fonction de la diminution de la température de l'air qui donnerait le même effet rafraîchissant en air calme.

Le tableau I. 3 donne les valeurs extraites du Guide pratique de ventilation (valables pour des conditions moyennes d'humidité et d'habillement).

| Vitesse de l'air [m/s] | Refroidissement équivalent [°C] |
|---|---|
| 0,1 | 0 |
| 0,3 | 1 |
| 0,7 | 2 |
| 1,0 | 3 |
| 1,6 | 4 |
| 2,2 | 5 |
| 3,0 | 6 |
| 4,5 | 7 |
| 6,5 | 8 |

Tableau I. 3 - Vitesse de l'air et refroidissement équivalent (CHERGUI Mohamed Amine 2012).

L'importance du mouvement d'air nécessité pour obtenir un effet rafraîchissant peut être évaluée dans une certaine mesure par l'expérience personnelle des vitesses extérieures de l'air.

La sensation de fraîcheur produite par un vent léger soufflant par une fenêtre par une chaude journée est familière à chacun. La vitesse généralement désignée par "brise légère" est de l'ordre de 2,5 m/s (CHERGUI Mohamed Amine 2012).

### I. 2. 2. 3. 3 Le métabolisme

#### i/ La production de chaleur

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.

La production de l'énergie métabolique, noté M, est le reflet de la vie cellulaire qui résulte de la consommation d'oxygène et du dégagement du gaz carbonique (Candas, 1998).

Cette énergie est dégagée essentiellement sous forme de chaleur. Une partie du métabolisme est utilisée par les muscles pour le travail externe, noté W, qui est défini en fonction du métabolisme par un facteur **η,** appelé rendement mécanique (**W = η.M** ; η n'excède pas 20% et pour les activités classiques de bureau il est pratiquement nul (Parsons, 2003). La chaleur métabolique est alors obtenue en déduisant le travail externe W du taux de métabolisme M.

$$H = M - W \qquad \text{(I. 5)}$$

En première approche, on peut considérer une « combustion » des aliments (essentiellement du carbone) grâce à l'oxygène fourni par la respiration. Ramenée à l'unité d'aire de la peau l'équation précédente peut aussi s'écrire : (Berkouk Djihed, 2017).

$$H'' = M''(1 - \eta) \qquad \text{(I. 6)}$$

Avec :

$H''$ la chaleur à dissipée de peau [W/m²],

$\eta$ rendement mécanique [1].

En état stable, la quantité de chaleur métabolique produite se déduit de la consommation d'oxygène calculée à partir des débits d'air ventilé et de la différence de concentration entre l'air inspiré et l'air expiré. En conditions normales, lorsque l'organisme est au repos et en équilibre nutritionnel, le quotient respiratoire global $\frac{MCO2}{MO2}$ de l'organisme est de 0,83. Pour une telle valeur, la consommation de chaque litre d'oxygène par heure produit en moyenne 5,57 W. Or, l'homme au repos consomme 0,31 L d'oxygène à la minute, soit 18,6 L/h ; il dégage donc 104 W (58.14 $W \cdot m^{-2}$ pour l'homme standard de 1,8 $m^2$) : c'est le métabolisme de repos (sujet assis, vêtu à la thermo neutralité) correspondant à la chaleur métabolique puisque aucun travail n'est fourni à l'extérieur du corps humain. Le métabolisme est exprimé souvent en $M_{et}$, l'unité de $M_{et}$ est égale à 58.15 W/m² et correspond au métabolisme d'un individu assis au repos. La norme (ISO 8996) propose plusieurs méthodes pour déterminer le métabolisme. Ces méthodes sont classées en quatre niveaux selon le degré de précision. La production de chaleur métabolique M en (W/m²) peut être mesurée par la consommation d'oxygène :

$$M = (0{,}23 \,.\, Qr + 0{,}77) \,.\, (5{,}87) \,.\, (VO2) \,.\, (60/\, A_{DU}) \qquad \text{(I.7)}$$

Avec :

M La production de chaleur métabolique [W/ m²].

$A_{DU}$ surface cutanée [m²],

$Q_R$ quotient respiratoire, c'est-à-dire le rapport entre $Vco_2$ et $Vco_2$ ($Q_R$ est compris entre 0,83 au repos et 1,00 lors d'un travail très intense) [1].

$V_{O2}$ consommation d'oxygène à 0°C et 101 KPa [L/min].

$\mathbf{V_{CO2}}$ production métabolique de gaz carbonique à 0°C et 101 kPa. [L/min].

**5,87** équivalent énergétique d'un litre d'oxygène lorsque le quotient respiratoire est égal à 1 [Wh/L].

Lorsque la consommation d'oxygène ne peut pas être mesurée, il est possible d'estimer M au moyen d'une analyse simplifiée du travail décomposant M en trois composantes (http://www.hqe.guidenr.fr/cible-8hqe/confort-thermique-bilan-thermique.php):

$$M = BM + MP + MW + MM \quad (I.8)$$

**Avec :**

M La production de chaleur métabolique [W/ m²].

$\mathbf{B_M}$ métabolisme basal [W/m²],

$\mathbf{M_P}$ composante posturale [W/m²],

$\mathbf{M_W}$ composante d'activité [W/m²],

$\mathbf{M_M}$ composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse [W/m²].

Le métabolisme basal est le métabolisme d'une personne couchée au repos dans des conditions définies. C'est la production de chaleur minimale nécessaire aux fonctions vitales de l'organisme. Il dépend du poids, de la taille, de l'âge et du sexe (AFNOR, 1990). Ces facteurs ont une influence faible. Des valeurs de 44 W/m² (homme) et 41 W/m² (femme) peuvent être utilisées avec une bonne approximation. Ces valeurs sont définies pour une personne standard (1.7m, 70 kg et 35 ans pour les hommes, et 1.6m, 60 kg et 35 ans pour les femmes). Les autres composantes du métabolisme sont données dans des tableaux pour les différentes dispositions. Enfin, le métabolisme peut être influencé énormément par la thermorégulation. Les frissons peuvent multiplier sa valeur jusqu'à 4 à 5 fois par rapport à une personne qui ne frissonne pas (Parsons, 2003). En plus, la thermorégulation comportementale peut avoir des effets non négligeables dans les conditions chaudes et froides. Dans les situations chaudes, les individus peuvent s'adapter en réduisant la vitesse de leurs mouvements, ceci se traduit par une réduction du métabolisme de près 10 % (Bruant, 1997).

Dans la pratique, le métabolisme est estimé à partir des tableaux qui donnent et déterminent le métabolisme en fonction de la description de l'activité ou de la tâche et par chaque méthode. La puissance métabolique est donnée par rapport à la surface corporelle.

| Niveau | Méthode | Précision | Étude du poste de travail |
|---|---|---|---|
| **1 Typologies** | 1A: Classification en fonction de la profession | Information grossière Risque d'erreur très important | Pas nécessaire, mais information requise sur l'équipement technique et l'organisation du travail |
| | 1B: Classification en fonction de l'activité | | |
| **2 Observation** | 2A: Tableaux d'estimation par les composantes | Risque d'erreur élevé Précision : ± 20 % | Étude des temps et des mouvements nécessaire |
| | 2B: Tableaux par activités spécifiques | | |
| **3 Analyse** | Mesurage de la fréquence cardiaque dans des conditions définies | Risque d'erreur modéré Précision : ± 10 % | Étude requise pour déterminer une période représentative |
| **4 Expertise** | 4A: Mesurage de la consommation d'oxygène | Erreurs dans les limites de précision de la mesure ou de l'étude des temps Précision : ± 5 % | Inspection du lieu de travail nécessaire |
| | 4B: Méthode de l'eau doublement marquée | | Inspection du lieu de travail pas nécessaire, mais estimation des activités de loisirs requise |
| | 4C: Calorimétrie directe | | Pas nécessaire |

Tableau I. 4 - Niveaux de détermination du métabolisme énergétique (ISO 8996, 2004).

Les valeurs caractéristiques de l'activité métabolique des individus sont fournies dans le tableau I. 5 suivant :

| Activité | Production de haleur | |
|---|---|---|
| | MET | W/m² |
| •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 I. 5 - Production de chaleur en fonction de l'activité (Guide technique de la diffusion d'air, 2006).

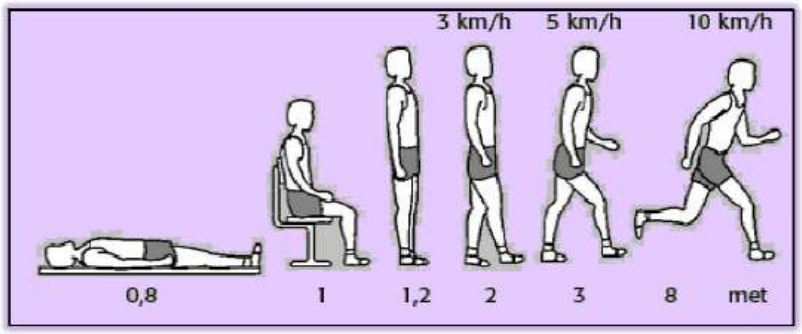



Figure I. 5 - Production de chaleur en fonction de l'activité (Guide technique de la diffusion d'air, 2006).

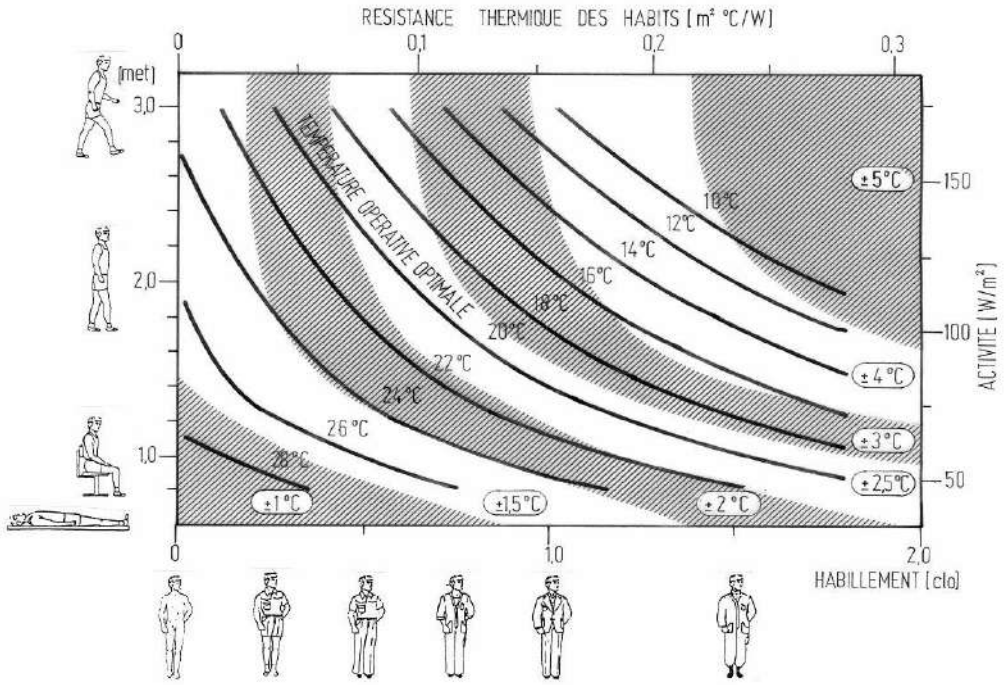



Figure I. 6 - Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme (EN ISO 7730, année).

Les valeurs notées dans les ovales, et correspondant pour chacune à une zone du graphique (blanc ou hachuré) représentent l'écart de température (par rapport à la température opérative idéale) pour laquelle le $P_{MV}$ vaut ±0.5. Par exemple pour 1 $c_{lo}$ et 1 $m_{et}$, la température opérative idéale est d'environ 23°C, et la zone usuellement considérée comme confortable ($P_{MV}$ ±0.5) correspond à l'intervalle 21°C à 25°C.

### I. 2. 2. 3. 4 Les échanges de chaleur

#### i/ Les échanges de chaleur cutanée

L'écriture mathématique des transferts de chaleur entre le corps humain et son environnement est basée sur une approche mixte analytique/empirique. Les bases de la théorie du transfert de chaleur permettent de décrire les différents mécanismes des échanges de chaleur sensible et latente, alors que les expressions empiriques sont utilisées pour déterminer les valeurs des coefficients d'échange de chaleur. Des expressions empiriques sont aussi utilisées pour décrire les mécanismes de régulation thermo-physiologique en fonction de la température interne et de la température cutanée.

### ii/ Les échanges de chaleur sensible

L'échange de chaleur sensible à la surface cutanée passe à travers les vêtements. Cet échange de chaleur peut être considéré en série : l'échange de chaleur de la surface cutanée à la surface externe des vêtements à travers l'épaisseur des vêtements, et l'échange de chaleur de la surface externe des vêtements à l'environnement. L'influence du vêtement est discutée plus tard.

La surface cutanée (en m²) se calcule à partir du poids P (kg) et de la taille T (en m) selon la formule : (Djongyang, René Tchinda , Donatien Njomo, 2010)

$$A_D = 0{,}202 \,.\, P^{0{,}425} \,.\, T^{0{,}725} \qquad \text{(I. 9)}$$

Les trois modes d'échange de chaleur sensible sont la conduction, la convection et le rayonnement.

### a/ La conduction

Les échanges par conduction sont souvent négligés comme les zones corporelles concernées sont petites, et quand des parties plus grandes de la surface corporelle sont en contact avec des éléments de mobilier (chaise, fauteuil, canapé, lit) les tissus en contact se mettent rapidement en équilibre et se comportent comme un isolant thermique par rapport à l'ambiance (Candas, 1998). Les éléments de mobilier sont souvent représentés par une valeur additionnelle sur l'isolation vestimentaire. Mc Collough (Mc Collough, 1994) a mesuré les valeurs d'isolement thermique dû à la chaise. Il a trouvé des valeurs entre 0.1 et 0.3 $c_{lo}$ selon le type de la chaise. L'isolement est d'autant plus important que la surface de contact entre le corps et la chaise soit plus grande

### b/ La convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement, en cas de convection naturelle. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps humain et s'élève pour former un contour de panache au-dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement (Nicol, 1993). Le mouvement de l'air peut aussi être imposé en cas de convection forcée ou mixte. En plus, il faut prendre en compte le mouvement relatif de l'air par rapport au corps en cas de certaines activités (marche, course,…) qui s'ajoute au mouvement effectif de l'air.
Quand l'air est plus chaud que la surface en contact, la convection résulte par un réchauffement du corps.

L'échange convectif dépend de la différence entre la température de l'air et celle du corps (peau ou vêtement), et du mouvement de l'air autour du corps. Il est calculé par l'expression suivante (ASHRAE, 1997).

$$C = F_{cl} h_c A_c (T_{cl} - T_a) \qquad \text{(I.10)}$$

**Avec :**

**C** Flux de chaleur convectif, [W/m²],

**$f_{cl}$** Facteur d'habillement, [1],

**$h_c$** Coefficient d'échange convectif, [W/m².K],

**$T_{cl}$** Température de la surface externe du vêtement [°C],

**$T_a$** Température d'air ,[°C],

**$A_c$** Surface cutanée exposée (souvent la surface total $A_D$) [m²].

Le coefficient d'échange convectif **$h_c$** dépend du mouvement de l'air effectif autour du corps. Il dépend aussi de la posture et de l'activité. ASHRAE (ASHRAE, 1997) a proposé plusieurs expressions empiriques pour calculer $h_c$ selon différentes configurations (personne assise, debout, en marche dans un air calme ou en mouvement), avec les limites d'application exprimées en termes de vitesse de l'air.

Le facteur **$f_{cl}$** est le rapport de la surface vêtue du corps à la surface corporelle, il est égal à 1 pour un sujet nu (l'isolement vestimentaire égale à 0), $f_{cl}$ =1, impliquant 100% des échanges possibles, l'isolement est grand, tend $f_{cl}$ vers 0, limitant le flux convectif. Le coefficient de convection hc est calculé par :

$$h_c = 2{,}38(T_{sk} - T_a)^{0{,}25} \text{pour} \quad v_a \leq 0{,}2 \text{m/s}$$

$$h_c = 3{,}5 + 5{,}2\, v_a \ \text{Pour} \quad v_a \leq 1 \text{m/S} \qquad \text{(I.11)}$$

$$h_c = 8{,}7\, v_a^{0{,}6} \ \text{Pour} \quad v_a > 1\ m/s$$

Avec :

$\mathbf{V_a}$ vitesse de l'air ambiant, [m/s].

$V_{ar}$ vitesse relative de l'air, [m/s].

La vitesse relative de l'air est la résultante de la vitesse de l'air $V_a$ par rapport à un objet immobile et de la vitesse de l'air par rapport au sol ; $V_{ar}$ peut être estimé par :

$$V_{ar} = V_a + 0{,}0052(M - 58) \qquad (I.12)$$

Avec:

M activité métabolique [$W/m^2$].

Les coefficients de ces relations sont donnés pour $h_c$ exprimé en ($W \cdot m^{-2}. K^{-1}$) et $V_a$ en ($m \cdot s^{-2}$).

Définissons ici le coefficient $h_{co}$ d'échange convectif en air calme ($V_a$= 0,05 $m \cdot s^{-1}$) qui vaut :

$$h_{co} = 3{,}5 + (5{,}2 \times 0{,}05) \approx 3{,}8\ (W / m2.K)$$

**c/ Le rayonnement**

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. On distingue deux catégories selon la bande d'émission : les échanges courts longueurs d'onde (rayonnement solaire) non pris en compte dans les bâtiments, et les échanges grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge) avec les parois qui entourent le sujet. A la température ambiante (300 °K), toutes les surfaces émettent des radiations principalement dans l'infrarouge dont la puissance est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement (Thellier, 1989).

Dans un souci de simplification et par analogie avec l'échange convectif, on utilise une formule simplifiée linéarisée (ASHRAE, 1997).

$$R = F_{cl} h_r A_r (T_{cl} - T_r) \qquad (I.13)$$

$$h_r = 4\varepsilon\theta f_{eff} \left[273 \times 2 + \frac{T_{cl}+T_r}{2}\right]^3 \qquad (I.14)$$

Où encore :

$$h_r = 4\varepsilon_{sk}\theta\, {}^{A_r}/_{A_d}\left[273 + \frac{T_{sk}+T_r}{2}\right]^3 \qquad \text{(I.15)}$$

Avec :

R Flux de chaleur radiatif, [W/m²].

$f_{cl}$ Facteur d'habillement, [1].

$h_r$ Coefficient d'échange radiatif linéarisé, [W/m².K].

$T_{cl}$ Température de la surface externe du vêtement, [°C].

$T_r$ Température radiante moyenne, [°C]..

E Emissivité moyenne du corps, [1].

σ Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67\times 10^{-8}$ [ W/m² $K^{4}$].

$f_{eff}$ Coefficient effectif de surface rayonnante, [1].

$A_r$ Surface cutanée qui rayonne, [m²].

$A_D$ Surface cutanée total, [m²].

$\frac{Ar}{Ad}$ Rapport entre la surface cutanée qui rayonne et la surface corporelle totale, joue le rôle d'un coefficient de forme qui vaut : $\begin{cases} -\ 0{,}67 \text{ pour le sujet accroupi} \\ -\ 0{,}70 \text{ pour le sujet assis} \\ -\ 0{,}77 \text{ pour le sujet debout} \end{cases}$

Le coefficient $f_{eff}$ est le rapport entre la surface du corps qui rayonne et la surface corporelle totale. Il joue le rôle d'un facteur de forme et dépend de la posture : 0.70 pour une personne assise et 0.73 pour une personne débout. Quant à l'émissivité, elle est typiquement proche de l'unité (ASHRAE, 1997).

$$h_r = 22 \times 10^{-R\frac{|T_r+T_{sk}|}{2}^3} \qquad \text{(I.16)}$$

Comme la surface Ar est difficile à déterminer, on écrit :

$$A_r = \frac{A_r}{A_d}A_d \quad \text{où :} \quad \frac{A_r}{A_d}$$

La température moyenne de rayonnement se déduit des mesures de température de globe noir (défini dans la norme ISO 7726) Tg, de la température de l'air et de la vitesse de l'air selon la formule :

$$T_r = \left[\frac{(T_g + 273)^4 + 1{,}10 \times 10^8 \cdot V_a^{0,6} \cdot (T_g - T_a)}{2}\right]^{1/4} - 273 \qquad \text{(I.17)}$$

$$\overline{T}_r = \left[(T_g)^4 + 2{,}5 \times 10^8 V_a^{0,6} (T_g - T_a)\right]^{1/4} \qquad \text{(I.18)}$$

Avec :

$T_g$ Température de la sphère noire, [°C],

$T_a$ Température moyenne de l'air, [°C],

$V_a$ Vitesse de l'air moyenne, [m/s].

$\varepsilon$ Émissivité (0,95 pour une sphère noire), [1],

D Diamètre de la sphère noire, [m].

Une formule simplifiée a été proposée pour une approximation de la température moyenne de rayonnement à partir des températures d'air $T_a$ et de globe noir $T_g$ ainsi que de la vitesse de l'air $V_a$ :

$$\overline{T}_r = T_g + 1{,}8\sqrt{V_a} \times (T_g - T_a) \qquad \text{(I.19)}$$

La température cutanée moyenne se calcul théoriquement comme suite :

$$T_{sk} = 30 + 0{,}093.T_a + 0{,}045.T_r - 0{,}571 \,.V_a + 0{,}0254 \,.P_{aH20} + 0{,}00128 \,.M - 3{,}571 \,.I_{cl} \qquad \text{(I.20)}$$

Avec :

$P_{aH2O}$ Pression partielle de vapeur d'eau ambiant [KPa],

$I_{cl}$ Isolement thermique du vêtement [K. m² /W].

Dans la plupart des cas, les environnements thermiques dans les bâtiments peuvent être considérés homogènes dans les zones occupées. Mais si l'environnement radiatif est fortement hétérogène (large baie vitrée, panneaux rayonnants), la température moyenne de rayonnement est insuffisante, il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement.

Les équations du flux convectif (Eq. I.10) et du flux radiatif (Eq. I.13) sont souvent combinées en vue d'exprimer l'échange total de chaleur sensible, par convection et rayonnement, en termes de température opérative $T_O$ et de coefficient d'échange de chaleur sensible h.

L'échange total de chaleur sensible exprimé par équation suivante :

$$h = h_r + h_c \tag{I.21}$$

$$(C + R) = f_{cl} h (T_{cl} - T_0) \tag{I.22}$$

La température de l'air et la température radiante peut être évaluée selon la température opératoire ($T_O$) (ASHRAE 55, 2013).

$$T_0 = \frac{h_r \overline{T}_r + h_c T_a}{h_r + h_c} \tag{I.23}$$

$$T_0 = A T_a + (1 - A) \overline{T}_r \tag{I.24}$$

Avec:

(C+R) Echange de chaleur sensible cutané [W/m²]

$T_0$ Température opérative, °C.

H Coefficient d'échange de chaleur sensible, [W/m²K].

A Egale à 0,5 [1] si la vitesse relative de l'air ($v_r$) est plus petite que 0,2, [m/s].

$h_r$ Coefficient d'échange radiatif linéarisé, [W/m².K]

$T_{cl}$ Température de la surface externe du vêtement, [°C].

$T_a$ Température moyenne de l'air, [°C]

$T_r$ Température radiante moyenne, [°C]

La zone de confort pour les occupants, selon ces critères, est illustrée par la zone hachurée sur un abaque psychrométrique dans l'ASHRAE 55-2013 (Figure I.5). Elle est décrite en fonction de la température opératoire (éq. I. 20) et de l'humidité dans les conditions où le taux métabolique est entre 1 et 1,3 mettant ainsi l'isolation des vêtements entre 0,5 et 1 $c_{lo}$. Cette zone de confort correspond à un pourcentage d'acceptabilité des occupants de 80%. La principale différence entre les conditions estivales et hivernales est la plage de la température opératoire selon l'isolation des vêtements. En résumé, en condition hivernale, la température opératoire minimum acceptable est d'environ 21,5 °C avec une faible $H_R$ et d'environ 19,5 °C avec une $H_R$ d'environ 85 % (température de rosée de 16,8 °C). La température opératoire maximum acceptable est d'environ 26,5 °C avec une faible $H_R$ et d'environ 24 °C avec une $H_R$ d'environ 65 % (température de rosée de 16,8 °C).

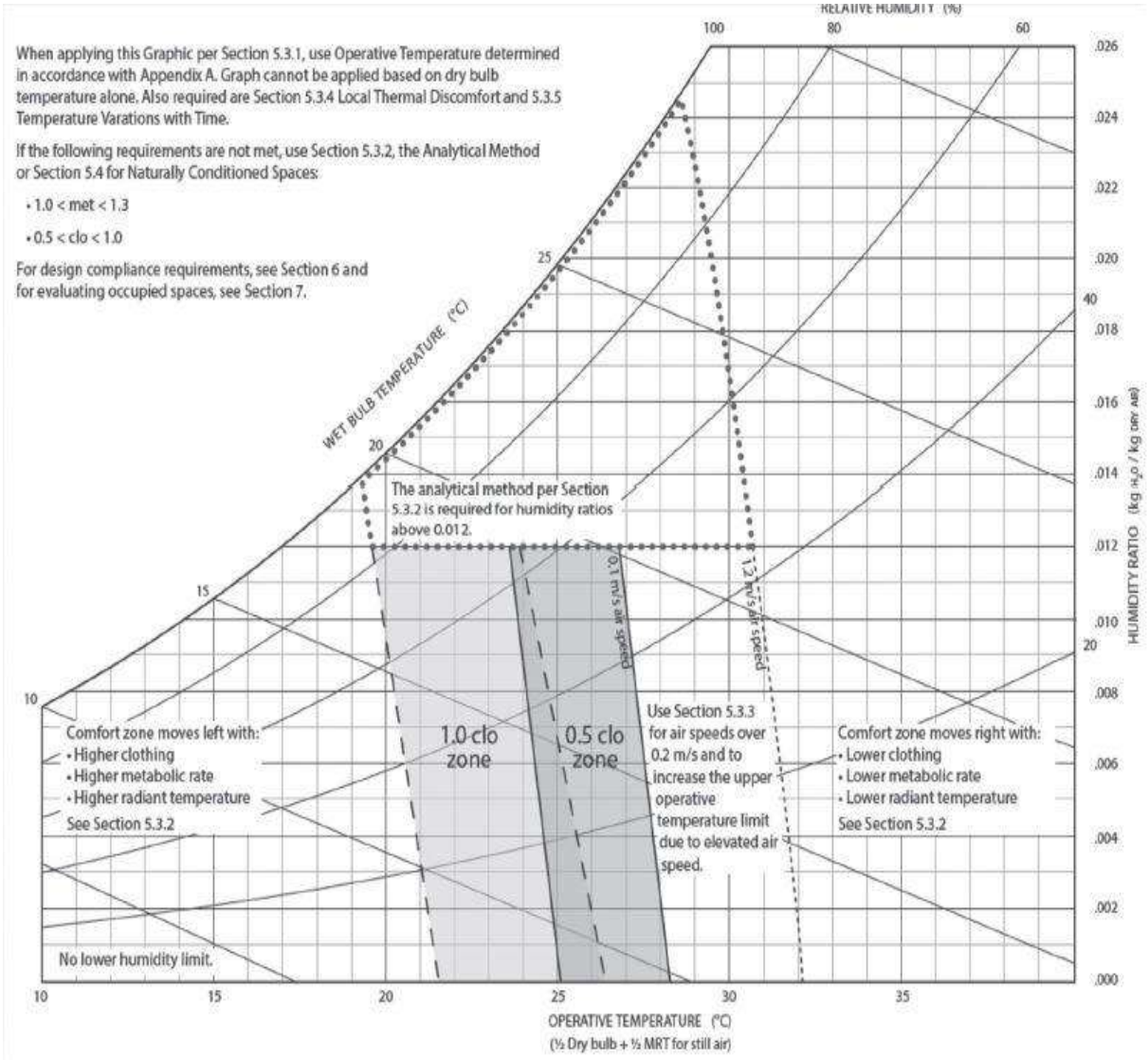



Figure I. 7 : Zone de confort en fonction de la température opératoire et de l'humidité, (ASHRAE 55,2013)

En considérant le vêtement comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température **$T_{sk}$** et la surface du tissu à température **$T_{cl}$**, les transferts de chaleur sensible peuvent être écrits de la façon suivante.

$$(C + R) = \frac{T_{sk} - T_o}{R_{cl} + {}^{1}/_{f_{cl}.h}} \qquad (I.25)$$

Avec :

$R_{cl}$ Résistance thermique vestimentaire [m².K/W].

$T_{cl}$ Température de la surface externe du vêtement [°C].

$f_{cl}$ Facteur d'habillement [1].

### I. 2. 2. 3. 5 Effet dû à l'humidité

A priori, l'humidité en elle-même n'a pas beaucoup d'impact sur les échanges thermique. Elle intervient parce que l'organisme humain a des muqueuses qui, par définition, sont toujours moites ou mouillées (lèvres, yeux, voies respiratoires). Aussi et à ce niveau les échanges sont relativement faibles mais la perception des changements est grande. Au niveau cutané, par contre, la sudation, quand elle se produit, permet une déperdition calorique évaporatoire importante régie par la loi (Kaidi Youcef, 2018) :

$$E = h_e(P_{aH2O} - P_{sH20})A_eF_{pcl} \qquad (I.26)$$

Avec :

E flux évaporatoire global.

$F_{pcl}$ facteur qui rend compte des effets de la perméabilité du vêtement.

$h_e$ coefficient évaporation qui selon l'analogie Nusselt Sherwood est directement proportionnel au coefficient de convection suivant la relation de Lewis (analogie entre le transfert de masse et le transfert de chaleur) :

$$h_e = Kh_c \qquad (I.27)$$

K=2,2(K.Torr $^{-1}$) ou encore 16 ,7 [K .KPa$^{-1}$].

Avec :

$P_{aH2O}$ Pression partielle de vapeur d'eau ambiante [kPa].

$P_{sH2O}$ Pression saturante de vapeur d'eau à la température cutanée $T_{sk}$ [kPa].

$A_e$ Surface d'évaporation, qui vaut : avec Ae = (Ae/Ad)*Ad. [m²].

Avec :

(Ae/Ad) Pourcentage de surface mouillée encore appelé mouillure cutanée : w (pour wettedness).

- S'il vaut 1 le vêtement est très perméable et tout se passe comme si le sujet était nu.
- S'il vaut 0 la perméabilité du vêtement est nulle et l'évaporation aussi.

### I. 2. 2. 3. 6. Les échanges de chaleur latente par l'évaporation (due à l'humidité)

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen essentiel pour évacuer la chaleur dans les ambiances chaudes par évaporation de la sueur à la surface cutanée. Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps. Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface cutanée, l'air environnant et la mouillure cutanée (Jacques Teller, 1985) :

$$E_{sk} = \frac{\omega(P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + {}^{1}/_{F_{cl} h_e}} \qquad (I.28)$$

Avec :

$E_{sk}$ Echange de chaleur évaporatoire cutanée [W/m²].

$h_e$ Coefficient d'échange de chaleur par évaporation [W/m²kPa].

$f_{cl}$ Facteur d'habillement [1].

$P_a$ Pression partielle de vapeur d'eau ambiante [kPa],

$P_{SK,S}$ Pression saturante de vapeur d'eau [kPa] à la température cutanée moyenne $T_{sk}$,

$R_{e,cl}$ Résistance vestimentaire à l'évaporation [m²kPa/W] (similaire à $R_{cl}$),

$\omega$ Mouillure cutanée [1].

Le coefficient d'évaporation $h_e$ peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif $h_c$ moyennant la relation de Lewis ($h_e/h_c = L_R$, où $L_R$ ) est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,7 °K/kPa pour des conditions intérieures typiques). (ASHRAE, 1997)

Où:

$h_e$ (W/m$^2$. kPa) = K $h_c$ (W/m2. K)

K = 16,7 °K. kPa$^{-1}$

La mouillure cutanée est le rapport entre la surface mouillée de la peau $A_c$ et la surface totale $A_D$ ; $\omega = A_c / A_D$. Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour $\omega$ =1 la peau est complètement mouillée) (NOEL DJONGYANG, RENE TCHINDA , DONATIEN NJOMO, 2010). La mouillure cutanée dépend de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. Le concept de mouillure est intéressant car il est représentatif de l'astreinte chaude. À 6 % de mouillure, on peut montrer que l'évaporation cutanée correspond à la perspiration insensible, perte minimale associée au confort du quotidien. À 100 % de mouillure, la contrainte est maximale.

La perte par évaporation (E) et alors réduits au prorata de la mouillure :

$$E_{sk} = \omega E_{max} \qquad (I.29)$$

Le débit maximal $E_{max}$ , est le débit que l'homme peut réaliser dans l'hypothèse d'une peau intégralement mouillée. Dans ces conditions :

$$E_{max} = h_e F_{pcl}(P_{sk,s} - P_a) \qquad (I.30)$$

Avec :

$F_{pcl}$ Facteur de réduction des échanges de chaleur latente par les vêtements [1]

Le débit évaporatoire requis $E_{req}$ correspond au débit évaporatoire que l'homme doit réaliser pour assurer l'homéothermie, il peut être déduit de la relation suivante :

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - S \quad (I.31)$$

Où

$$E_{req} = 0{,}42 - (M - W - 58{,}15) \quad (I.32)$$

Toutefois, cet équilibre ne pourra être atteint que si $E_{req}$ reste inférieur à $E_{max}$ possible dans l'ambiance considérée. Le rapport entre $E_{req}$ et $E_{max}$ définit la mouillure cutanée requise ($\omega_{req}$) pour assurer l'équilibre thermique. Plus $E_{req}$ est proche de $E_{max}$ et plus l'organisme doit sécréter de sueur de façon à mouiller une plus grande surface cutanée.

Cette augmentation de la mouillure s'accompagne d'un phénomène inévitable : une fraction de la sueur n'est pas évaporée, mais ruisselle sur le corps sans aucun bénéfice thermique pour l'organisme. Le rapport entre la fraction évaporée de la sueur (E) et la sueur sécrétée ($S_w$), c'est-à-dire le rendement évaporatoire (r) entraine une diminution de la sudation.

La sudation requise ($S_{w\,Req}$) pour que l'évaporation requise soit réalisée est donnée par:

$$S_{wreq} = {}^{E_{req}}\!/_{r} \quad (I.33)$$

Et : $$r = 1 - 0{,}5\exp\left[-6{,}6(1 - W_{req})\right]$$

### I. 2. 2. 3. 7. Les échanges de chaleur par respiration

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur sensible et latente, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. A la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps humain, et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire. Le flux de respiration est calculable directement comme un débit d'enthalpie, mais il est intéressant ici d'en distinguer les deux composantes : « sèche » ($C_{res}$) et « évaporée» (E), respectivement fonction de t et de p de l'air L'ASHRAE (ASHRAE, 1997) donne l'équation suivante pour calculer les échanges respiratoires :

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad \text{(I.34)}$$

La perte de chaleur sensible est fonction de la température de l'air expiré et de la température de l'air ambiant.

$$C_{res} = M_{air} \,.\, C \,.\, (T_{exp} - T_a) \quad \text{(I.35)}$$

La perte de chaleur latente est fonction de la différence entre humidité spécifique de l'air expiré et de celle de l'air ambiant.

$$E_{res} = M_{air} \,.\, L(W_{ex} - W) \quad \text{(I.36)}$$

La ventilation pulmonaire en Kg/s est principalement fonction du métabolisme. D'après FANGER, on peut considérer qu'il est égal à :

$$\dot{M_{air}} = 1{,}4 \times 10^{-6}\, \ddot{M}.A \quad \text{(I.37)}$$

On sait par ailleurs que l'humidité de l'air expiré dépend dans une certaine mesure des conditions de l'air inspiré. La différence d'humidité spécifique entre air expiré et inspiré s'écrit:

$$W_{ex} - W = 0{,}0277 + 0{,}000065 \,.\, T - 0{,}80 \,.\, W \quad \text{(I.38)}$$

$$W_{ex} - W = 0{,}0279 - 0{,}80 \,.\, W \quad {}^{\text{kg eau}}/_{\text{kg air sec}}$$

En remplaçant la ventilation pulmonaire dans $C_{res}$ et les humidités spécifiques par les pressions partielles correspondantes dans $E_{res}$ on obtient ainsi (ASHRAE, 1997) :

$$C_{res} + E_{res} = 0{,}0014 \,.\, M \left(T_{exp} - T_a\right) + 0{,}0173 \,.\, M(P_{exp} - P_a) \quad \text{(I.39)}$$

Avec :

$\mathbf{C_{res}}$ **F**lux de chaleur par convection respiratoire, [W/m²].

**C** Chaleur massique de l'air = $10^3$ **[**J/Kg.K].

$\mathbf{E_{res}}$ **F**lux de chaleur par évaporation respiratoire, [W/m²].

**M** Production de chaleur métabolique, [W/m²].

$\mathbf{T_{exp}}$ Température de l'air expiré, [°C] (~34 °C).

$\mathbf{T_a}$ Température de l'air ambiant, [°C]

$\mathbf{P_{exp}}$ Pression de vapeur d'eau dans l'air expiré, [kPa] (5,87 kPa à 34°C).

$\mathbf{P_a}$ Pression de vapeur d'eau dans l'air, [kPa].

$\mathbf{W_{ex}}$ Humidité spécifique (contenu en eau) de l'air expiré Selon une corrélation expérimentale de FANGER, l'air inspiré est saturé à 35.8°, donc légèrement sursaturé à 34°C, [kg eau / kg air sec].

**W** Humidité spécifique de l'air ambiant, [kg eau / kg air sec]

### I. 2. 2. 3. 8. L'influence des vêtements

Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimental, à travers leurs résistances thermiques, en modifiant les échanges de chaleur et de masse entre la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables surtout en hiver. Le comportement thermique des vêtements d'une personne en activité est complexe et dynamique. Un vêtement noir absorbe davantage la chaleur de rayonnement qu'un vêtement blanc. Plus un vêtement est réfléchissant (tenue métallisée par exemple) plus il renvoie l'énergie calorique à l'extérieur.

Les transferts de chaleur à travers les tissus se font par conduction, et les transferts de masse par diffusion pour la phase vapeur et migration pour la phase liquide. A la surface extérieure, les échanges se font avec l'environnement par convection, rayonnement et évaporation.

De nombreux facteurs peuvent influencer les échanges de chaleur et de masse à travers les vêtements. A part leurs résistances thermiques et leurs résistances à l'évaporation, il peut y avoir un effet tampon par adsorption de l'eau, un effet de pompage de l'air dû au mouvement du corps ou la pénétration de l'air à travers les tissus ou les orifices. La nature du tissu, la coupe des vêtements, l'activité et la posture du sujet influencent aussi les différents modes de transferts (Thellier, 1999).

Pour évaluer leurs propriétés thermiques, un modèle simple du comportement thermique des vêtements est utilisé afin de quantifier les valeurs des éléments nécessaires pour le calcul des échanges thermiques entre l'homme et l'environnement, notamment l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation.

Le modèle simple considère les vêtements comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau et la surface du tissu. La tenue vestimentaire est ainsi représentée par l'isolement thermique intrinsèque du vêtement $I_{cl}$, en m².°C/W**,** qui est l'isolement entre la peau et la surface de vêtement. La définition de l'isolement thermique d'une tenue vestimentaire inclut également les parties non recouvertes du corps comme la tête et les mains. Pour cela, il est approprié d'utiliser l'unité ($C_{lo}$) pour l'expression de l'isolement thermique (1 $c_{lo}$ = 0,155 m².°C/W). L'unité de $c_{lo}$ correspond à l'isolement nécessaire au maintien de la balance thermique de l'homme sédentaire à 21 °C en air calme.

Pour tenir compte de l'accroissement de surface dû aux vêtements, le facteur $F_{cl}$ a été introduit. Il peut être calculé à partir des valeurs de $I_{cl}$. L'isolement thermique des vêtements peut être mesuré expérimentalement sur un mannequin. En pratique, il est estimé à partir de tableaux de valeurs mesurées sur un mannequin thermique. La norme ISO 9920 permet le calcul de Icl à partir des valeurs ($c_{lo}$) des pièces unitaires ou à partir des exemples de tenues citées (AFNOR, 1995).

Plus précisément, la (Figure I.6) illustre la variation de l'isolation typique des vêtements des personnes selon la température extérieure prise à 6 h.

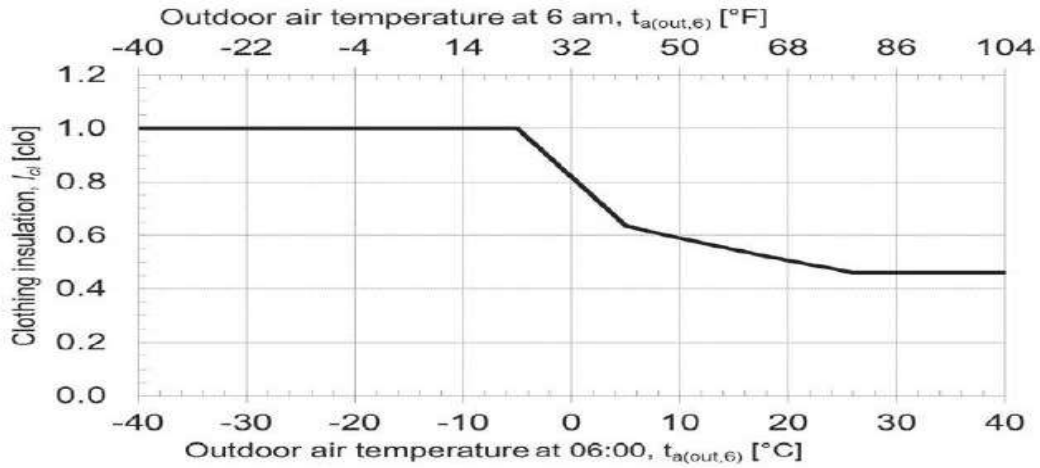



Figure I. 8 - Isolation typique des vêtements selon la température extérieure à 6 (ASHRAE 55,2013)

Le modèle simple à un seul paramètre, qui est l'isolement thermique, représente une approximation du comportement thermique des vêtements dans les ambiances modérées où les conditions sont homogènes et confortables, et les sujets exercent une activité légère (Parsons, 2003). Il est souvent utilisé dans la pratique pour la plupart des applications, surtout dans les bâtiments. Par contre, il présente des limitations comme il ne prend pas en compte le transfert de masse à travers les vêtements qui joue un rôle important dans le cas de transpiration pour les sujets en activité intense et/ou dans les ambiances chaudes.

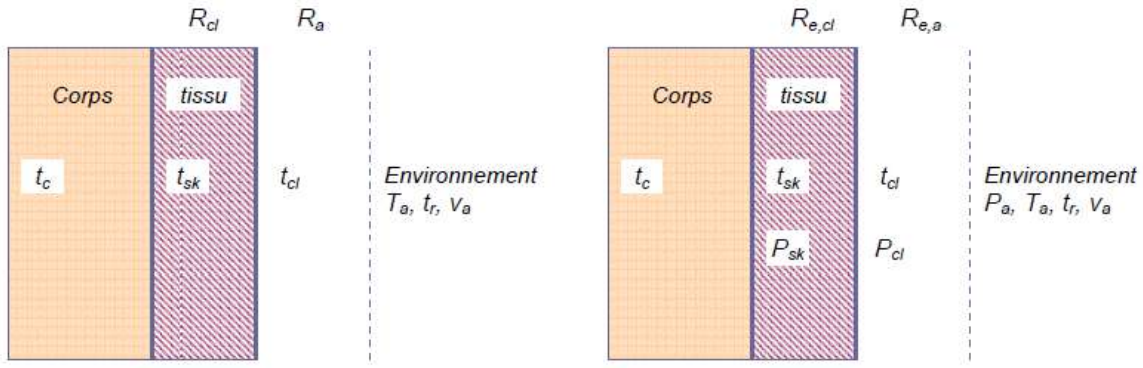



Figure I. 9 – Les modèles simples du comportement thermique des vêtements. (à gauche le modèle à un seul paramètre : l'isolement thermique et à droite le modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation) (Parsons, 2003).

### I. 2. 2. 3. 9. 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 influent sur les échanges de chaleur convectifs et radiatifs. « A des températures de l'air inferieures 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 ». Or, l'équilibre thermique de l'individu au repos assis suppose qu'il ne perde, par convention et rayonnement, pas plus que son métabolisme, ici de l'ordre de 44 ($W/m^2$) quand on a déduit, des 58 ($W/m^2$) du repos, les pertes convective et évaporatoire liées à la respiration et qui représentent 14 ($W \cdot m^{-2}$). La résistance totale à produire pour ne perdre que ces 44 ($W/m^2$) restant à éliminer est donc de 0,28 ($K \cdot m^2/W$) (Kaidi Youcef, 2018).

Cet isolement de 0,28 ($K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$) correspond à l'isolement total $I_t$, qui est la somme de deux isolements : l'isolement de la couche limite d'air ($I_a$) et l'isolement vestimentaire ($I_{cl}$).

La poursuite du calcul implique la connaissance des coefficients d'échange de chaleur sensible par convection et par rayonnement.

En air calme, le coefficient $h_{co}$ est de 3,8 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) et le coefficient $h_r$ est, pour l'homme assis, de 4,2 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) $I_a$ ce qui vaut donc :

$$I_a = \frac{1}{h_{co} + h_r} = \frac{1}{3,8 + 4,2} = 0,125\ [K \cdot m2/W]$$

L'équilibre supposant une valeur de 0,28 (K·m2·W–1), on déduit que l'isolement vestimentaire nécessaire est :

$$I_{cl} = I_T + I_a = 0{,}28 + 0{,}125 = 0{,}155\ [K \cdot m2/W]$$

Cette valeur particulière $I_{clo}$ a été définie comme valant 1 « $c_{lo}$ », isolement nécessaire au maintien de la balance thermique de l'homme sédentaire à 21 $C^o$ en air calme.

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'autre 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, en terme physique le $c_{lo}$ est équivalent à 0,18 [°C.h.m²/kcal].

### I. 2. 2. 3. 10 Résistance thermique vestimentaire

Le vêtement, qui s'entrepose entre la peau et l'ambiance, constitue une résistance aux transferts de chaleur et de vapeur d'eau. De ce fait, les flux C, R, $E_{max}$ sont réduits. Les facteurs de réductions sont fonction, d'une part, des coefficients de convection thermique $h_c$ et de rayonnement thermique $h_r$ et, d'autre part, de l'isolement thermique effectif du vêtement $I_{cle}$ :

$$F_{cl} = {}^{1}\!/_{[1 + (h_c + h_r) I_{clc}]} \qquad (I.40)$$

$$= 1[1 + 0{,}92\ .\ h_c I_{clc}]$$

$$I_{clc} = I_{cl} - \left[ \left( {}^{1}\!/_{F_{cl}} \right)_{/(h_c + h_r)} \right]$$

Où encore :

$$F_{cl} = {}^{1}\!\Big/\left[1 + 0{,}155\left(h_c + {}^{h_r}\!/_{I_{cl}}\right)\right] \qquad (I.41)$$

$$F_{pcl} = {}^{1}\Big/\left[1 + 0{,}155\, h_e \frac{I_{cl}}{i_m}\right]$$

Avec :

$F_{cl}$ Facteur de modulation des effets convectifs et radiatifs (sans dimension)

$F_{pcl}$ Facteur réducteur des capacités évaporatoires

$i_m$ Indice de perméabilité du vêtement (sans dimension)

$f_{cl}$ Facteur de surface du vêtement (rapport entre la surface de l'homme vêtu et la surface de l'homme nu ($A_{cl}$ /$A_D$). Le facteur f est en première approximation fonction de $I_{cl}$:

$F_{cl} = 1 + 1{,}290\, I_{cl}$ si $I_{cl}$ = 0,078 [m².K/W]

$F_{cl} = 1 + 0{,}645\, I_{cl}$ si $I_{cl}$ > 0,078 [m².K/W]

L'évaluation de l'isolement thermique $I_{cl}$ peut se faire soit sur la base de tableaux donnant l'isolement thermique vestimentaire pour différents ensembles vestimentaires caractéristiques (tableau 1.5), soit sur la base des isolements thermiques intrinsèques $I_{cli}$, de divers éléments vestimentaires (tableau I.6). Ces deux tableaux sont extraits de la norme ISO7730. $I_{cl}$ est obtenu par somation $\sum I_{cli}$ des isolements élémentaires au moyen de l'équation :

$$I_{cl} = 0{,}82 \sum I_{cli} \qquad (1.42)$$

| **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 I. 6 - Isolement thermique dû aux vêtements : (Guide technique de la diffusion d'air, 2006)

| Élément vestimentaire | Icli |
|---|---|
| Slip | 0.002 |
| Chaussettes légères | 0,005 |
| Chaussettes chaudes | 0.006 |
| Sous-vêtements; slip et soutien-gorge | 0,008 |
| jupon | 0.020 |
| combinaison | 0.029 |
| caleçon | 0.008 |
| maillot de corps | 0,009 |
| Chemisette: T-shirt | 0.014 |
| légère à manches courtes légère à manches longues | 0.031 |
| , chaude à manches courtes | 0.043 |
| Jupe chaude | 0.039 |
| Robe: légère | 0,034 |
| chaude | 0,026 |
| Chandail: léger à manches courtes | 0.098 |
| chaud à manches longues | 0,026 |
| Veste chaude | 0,057 |
| Pantalon: léger | 0,076 |
| moyen | 0,040 |
| chaud | 0.050 |
| Chaussures légères | 0.068 |
| | 0.006 |

Tableau I.7 - Isolements thermiques intrinsèques d'éléments vestimentaires $l_{cil}$ (En $m^2$. K/W) (Jedidi, Malek. Bendjedou, OMRANE, 2016).

### I. 2. 3 L'aspect psychologique : sensation et confort Thermique

L'aspect psychologique concerne la sensation et le comportement de l'individu dans un environnement thermique (Parsons, 2003).

#### I. 2. 3. 1 La sensation thermique

La sensation thermique correspond à l'aspect qualitatif (chaud ou froid, localisation) et quantitatif (intensité) 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 l'information sur l'état thermique de l'individu [Narçon, 2001].

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 (Tableau I.8).

L'échelle de l'ASHRAE est souvent utilisée en affectant à la sensation neutre la valeur zéro (sensation chaude = +3, sensation froide = -3 et ainsi de suite) [AFNOR, 1995].

L'échelle de l'ASHRAE est préférée à celle de Bedford qui confond la sensation et l'agrément. Enfin, il est important de ne pas confondre entre l'équilibre et la neutralité thermique. L'équilibre thermique du corps humain peut être assuré dans une large zone de conditions d'ambiance grâce aux mécanismes de thermorégulation, la neutralité thermique correspond en revanche à une bande plus étroite pour laquelle les phénomènes de thermorégulation décrits précédemment ne sont pas (ou peu) mis en jeu.

| L'échelle de Bedford | | L'échelle de l'ASHRAE | |
|---|---|---|---|
| 7 | Très chaud | 7 (+3) | Très chaud |
| 6 | Chaud | 6 (+2) | Chaud |
| 5 | Confortablement chaud | 5 (+1) | Légèrement chaud |
| 4 | Confortable | 4 (0) | Neutre |
| 3 | Confortablement froid | 3 (-1) | Légèrement froid |
| 2 | Froid | 2 (-2) | Froid |
| 1 | Très froid | 1 (-3) | Très froid |

Tableau I. 8 - Les échelles de caractérisation de la sensation thermique.

### I. 3 Méthodes actuelles pour atteindre le confort thermique

En se rendant compte de l'importance de l'effet du confort thermique sur la santé et la productivité des hommes, de nombreux travaux de recherche ont été menés dans ce domaine dès le début du siècle dernier. Ces travaux sont effectués dans des chambres climatiques ou in situ, sur des mannequins ou avec des êtres humains et sont basée sur des évaluations du transfert thermique entre les êtres humains et leur environnement ainsi que sur des conditions physiologiques requises pour un confort thermique. A la suite de ces travaux, plusieurs indices de confort thermique ont été développés en se basant sur des modèles du confort thermique. Les méthodes les mieux connues et les plus largement acceptées sont l'indice de confort thermique PMV proposé par FANGER (FANGER 1972) et le modèle à deux nœuds de thermorégulation humaine de J.B. Pierce, (GAGGE 1973 et GAGGE et al. 1986). Plusieurs normes de confort thermique stable ont été établies sur la base de ces modèles (Jedidi, Malek. Bendjedou, OMRANE, 2016).

### I. 3. 1 Modèle de GAGGE

GAGGE (GAGGE A.P., FOBELETS A.P. et BERGLUND L.G, 1986) a modélisé le corps humain en deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et la peau. Son modèle est une version simplifiée de celui développé par STOLWIJK et Hardy pour la NASA (ASHRAE Hand-book, 1997). Contrairement au modèle statique de FANGER, celui-ci est un modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires.

En sortie du modèle, la température cutanée et la mouillure cutanée sont utilisées pour le calcul d'un indice développé par GAGGE, le $S_{ET}$. Cet indice ($S_{ET}$) représente la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet portant une vêture standard échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même réponse physiologique que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Cet indice est ainsi associé au confort thermique (Dr R.Cantin, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino, 2005)

### I. 3. 2 Modèle de FANGER: $P_{MV}$-$P_{PD}$

Dans les années soixante-dix, FANGER (FANGER P.O. et TOFUM J, 2002) a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique. Cette méthode est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique. Il a déterminé aussi expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et sudation) nécessaires pour le confort thermique sous des conditions thermiques homogènes et stationnaires. En écrivant le bilan thermique, il a exprimé, à l'aide de l'indice $P_{MV}$, la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps humain à l'environnement par rapport à celui qui correspond aux conditions de confort. Le $P_{MV}$ exprime la sensation thermique moyenne éprouvée par un large groupe d'individus sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (CANDAS, Victor, 2008).

L'ASHRAE présente les deux équations déterminées par Rohles et Nevins pour calculer les valeurs de la température cutanée ($t_{sk}$,$r_{eq}$) et du débit sudoral ($E_{rsw}$,$r_{eq}$) nécessaires pour le confort thermique à partir du métabolisme (M-W).

$$T_{sk,req} = 35{,}7 - 0{,}0275 \,.\, (M - W) \qquad \text{(I.43)}$$

$$E_{rsw,req} = 0{,}42 \,.\, (M - W - 58{,}15) \qquad \text{(I.44)}$$

### I. 3. 2. 1 Indices pour atteindre le confort thermique

De nombreux travaux de recherche, réalisés à l'intérieur des bâtiments ou dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées en laboratoire, ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices, nommés « indices de confort thermique », qui sont en général définis en fonction de la température et de la vitesse de l'air.

Nous ne citerons ici les indices les plus couramment utilisés dans l'ensemble des normes de confort.

### I. 3. 2. 2 Les indices $P_{MV}$ et $P_{PD}$

À partir d'études réalisées en laboratoire sous des conditions stables, c'est-à-dire sans que l'individu ne change ni de vêtements, ni d'activité physique, FANGER a développé les indicateurs de confort thermique : le Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et le Pourcentage Prévisible D'insatisfait ($P_{PD}$). Le premier indice ($P_{MV}$) prédit la sensation thermique moyenne d'un large groupe d'individus et le second indice ($P_{PD}$) prédit le pourcentage d'occupants insatisfaits de l'environnement thermique.

❖ **Le Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$)**

Le $P_{MV}$ établi par FANGER permet de mesurer une sensation thermique globale du corps humain à partir du métabolisme et donne la moyenne des votes en référence à une échelle de sensation thermique. Les valeurs de l'indice $P_{MV}$ varient entre $-3 < P_{MV} < 3$ comme l'indique le Tableau I. 9

En constatant que les questionnaires utilisés pour évaluer le confort peuvent omettre certaines situations de confort, FANGER a avancé le postulat suivant : « Sont déclarées inconfortables toutes les personnes ayant des sensations supérieures à l'échelle 2 ($P_{MV} > 2$) ou inférieures à l'échelle -2 ($P_{MV} < 2$)». Il a ensuite associé le $P_{PD}$ (*Pourcentage Prévisible D'insatisfaits*) qui exprime le pourcentage des sujets «insatisfaits» de manière générale.

| VALEURS DE L'INDICE PMV | +3 | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | -3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SENSATION THERMIQUE | Chaud | Tiède | Légèrement tiède | Neutre | Légèrement Frais | Frais | Froid |

Tableau I. 9 : Correspondances entre $P_{MV}$ et échelle des sensations thermiques

❖ **Le Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)**

À cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales". Le pourcentage prévisible d'insatisfaits ($P_{PD}$) est exprimé sous forme de pourcentage des sujets «insatisfaits» d'une ambiance thermique déterminée.

Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum, qui correspond aux conditions optimales de neutralité thermique du corps humain ( MAZARI Mohammed, 2012). Il reste néanmoins, en moyenne, 5% d'insatisfaits lorsque le $P_{MV}$ est nul, comme le montre la figure I.7 suivante (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

La norme ISO 7730 (ISO 7730, 1994) stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique, il faut que :

$$-0{,}5 < P_{MV} < 0{,}5 \quad \text{soit} \quad P_{PD} < 10\ \%$$

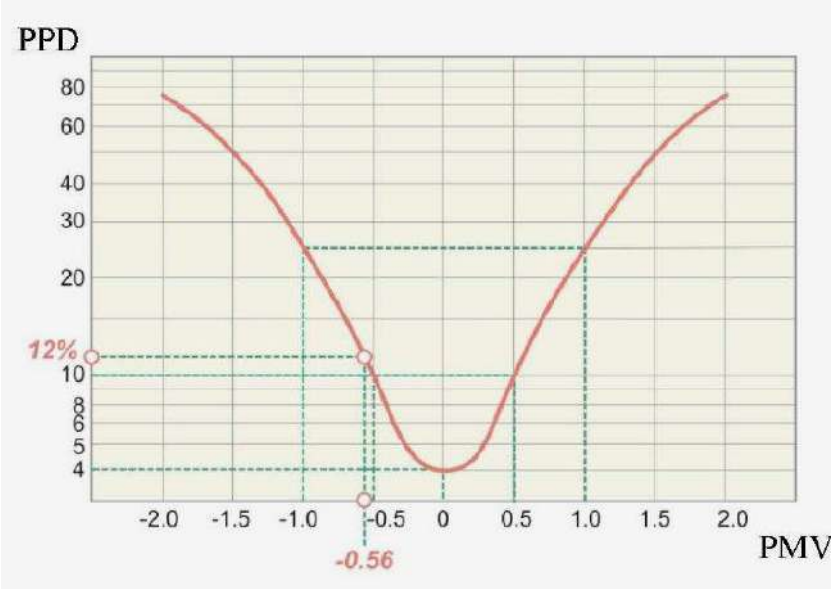



Figure 1. 10 - Correspondances entre $P_{MV}$ et $P_{PD}$, (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

### I. 3. 2. 3 Paramètres influant le confort thermique

En 1982, FANGER a établi une équation prédisant le $P_{MV}$ à partir des paramètres de confort qui sont énumérés ci-dessous (FANGER P.O. et TOFUM J, 2002):

- Température de l'air ..... $T_a$ [°C] ou en [°K].
- Température radiante moyenne ..... $T_{mrt}$ [°C] ou en [°K].
- Vitesse relative de l'air..... V [m/s].

- Pression partielle de la vapeur d'eau — P [Pa].
- Activité métabolique du sujet — M [Watt].
- Son travail mécanique fourni — W [Watt].
- Surface de peau du sujet — A [$m^2$].
- Activité spécifique du sujet — m = M/A [$W/m^2$].
- Son travail spécifique — w = W/A [$W/m^2$].
- La résistance thermique des habits — R [$m^2$ K/W].
- Ou l'habillement — [$C_{lo}$] = R/0.155,
- La fraction de la surface habillée — $f_{cl}$ [1].

### I. 3. 2. 3. 1 Calcul des indices de confort PMV et PPD

Le modèle utilisé est celui de FANGER. Ce modèle s'éclate en cinq équations suivantes (CHERGUI Mohamed Amine ,2012) :

$$PM_V = (0{,}303\,.\exp(-0{,}036\,.M) + 0{,}028)\left[M - 3{,}05^{-3}\,.(5733 - 6{,}99\,.M - P_a) - 0{,}42(M - W - 58{,}15) - (1{,}7\times10^{-5}.M\,(5867 - P_a) - 0{,}0014\,.M(34 - T_a) - (3{,}96\times10^{-8}\,.F_{cl}[(T_{cl}+273)^4 - (T_r+273)^4] + F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)\right] \quad \text{(I.45)}$$

$$T_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028\,.M - 0{,}155I_{cl}.[3{,}96\times10^{-8}\,.F_{cl}((T_{cl}+273)^4) + F_{cl}h_c(T_{cl} - 273)] \quad \text{(I.46)}$$

$$h_c = \begin{cases} 12{,}1\sqrt{V} & \text{Si} \quad 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} \le 12{,}1\sqrt{V} \\ 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} & \text{Si} \quad 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{V} \end{cases} \quad \text{(I.47)}$$

$$F_{cl}\begin{cases} 1{,}00 + 0{,}2\,.I_{cl} & \text{Si} \quad I_{cl} \le 0{,}5 \text{ clo} \\ 1{,}05 + 0{,}1\,.I_{cl} & \text{Si} \quad 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25}\, I_{cl} > 0{,}5\, clo \end{cases} \quad \text{(I.48)}$$

La relation entre $P_{PD}$ et $P_{MV}$ est comme suit :

$$PP_D = 1 - 0{,}95\exp(-0{,}003353\,.PMV^4 - 0{,}2179\,.PMV^2) \quad \text{(I.49)}$$

### I. 3. 3 Les modèles approfondis (Foura Samir, 2007)

Le développement rapide de l'informatique pendant les dernières décennies a permis d'approfondir la recherche dans le domaine du confort thermique en créant et en affinant les modèles thermiques du corps humain. Il s'agit d'une simulation dynamique du comportement thermique et physiologique du corps humain dans une ambiance thermique donnée (bâtiment, voiture, scaphandre, etc.), transitoire et hétérogène, à travers un système d'équations différentielles. Les modèles thermiques comportent une description du système passif (corps humain) qui est le sujet aux différents échanges thermiques ayant lieu à l'intérieur du corps et à l'extérieur avec le milieu environnant, et du système actif de thermorégulation. Le modèle le plus connu est celui de Stolwijk (Stolwijk Jerry, 1971).

Conçu initialement pour la NASA, il a été diffusé, utilisé et perfectionné plus-tard par plusieurs laboratoires. Il représente le corps humain et sa thermorégulation. Le corps est divisé en 6 segments : tête (sphérique), tronc, bras, mains, jambes et pieds (cylindriques). Chacun de ces segments est composé de 4 couches : peau, graisse, muscles et noyau. Le 25$^{ème}$ segment du modèle représente le sang qui assure un pont thermique entre tous les compartiments (Figure I.8). Le vêtement est modélisé par une couche d'air sous une couche de tissu. Chaque couche (physiologique et vêtement) est considérée homogène et isotherme. Il n'y a aucun échange au sein d'une même couche, aucun transfert dans le sens longitudinal. Les transferts thermiques par conduction entre les segments sont négligés ; ils ne sont reliés entre eux que par le débit sanguin. Le métabolisme est réparti dans toutes les couches, le métabolisme d'activité ou de frisson n'a lieu que dans les muscles. Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse. Les pertes respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête et du tronc. Le bilan thermique détaillé (débit de chaleur et températures) est calculé pour chaque compartiment du modèle. Il prend en compte l'environnement thermique (qui peut être transitoire et spatialement hétérogène) et les réactions thermo-physiologiques de l'individu. Le système de régulation est composé de trois éléments : les récepteurs, l'intégrateur et le répartiteur, et permet une représentation simple d'un système de thermorégulation humain sous forme des températures de consigne. Selon le signal d'écart détecté par l'intégrateur, une commande est envoyée et répartie entre les différents organes effecteurs en fonction des coefficients de contrôle.

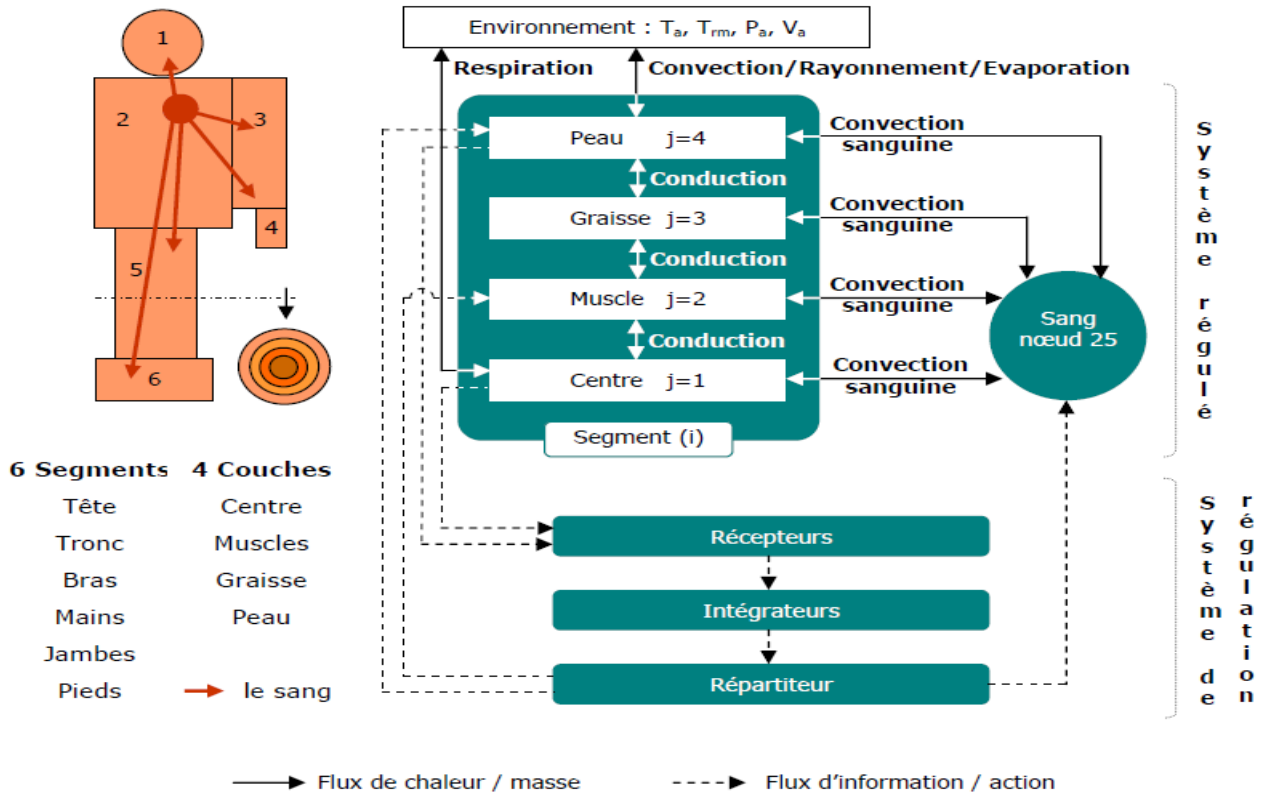



Figure I. 11 - Schématisation du modèle thermique de Stolwijk (Stolwijk Jerry, 1971).

Plusieurs modèles ont été développés sur la base de celui-ci en affinant le découpage ou en améliorant le calcul des transferts de chaleur, la représentation des vêtements ou même du système de régulation (Thellier, 1989); (Fiala, 1999); Tanabe, 2002).

Thellier a repris ce modèle en améliorant les modèles de transfert de chaleur, les transferts à travers les vêtements en vue d'intégrer une version améliorée du modèle dans le logiciel TRNSYS. Ce modèle a été adapté pour les différents usages dans le bâtiment, la voiture ou le scaphandre. Dans le domaine de l'habitat, un modèle appelé MARCL (Modèle d'Analyse et de Recherche sur le Confort Local) a été développé (Thellier, 1999).

### I. 4 Les inconforts locaux (Foura Samir, 2007)

Les modèles analytiques simples, tels que le $P_{MV}$ ou celui de Gagge ($S_{ET}$), sont les plus couramment utilisés dans les bâtiments. Ces modèles prévoient l'état thermique global du corps humain. Or l'insatisfaction thermique peut être aussi causée par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps (tête, pieds, ou mains), comme, par exemple, par un courant d'air. Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et la cheville, à un sol trop chaud ou trop froid, ou à une asymétrie de rayonnement thermique. La norme (ISO 7730,1994) propose une formule pour évaluer la gêne due au courant d'air à travers un indice $D_R$ (de l'anglais « Draught Rating ») qui prédit le pourcentage de la population qui serait dérangé par ce courant d'air. La formule est la suivante :

$$D_R = (34 - T_a)(V - 0{,}05)^{0{,}62}(0{,}37\,V \,.\, T_u + 3{,}14) \qquad \text{(I.50)}$$

Avec :

**$D_R$** Le gêne par courant d'air [%,].

**$T_a$** Température locale de l'air [°C],

**V** La vitesse d'air moyenne locale [m/s],

**$T_u$** L'intensité locale de turbulence définie comme le rapport entre l'écart-type de la vitesse d'air locale et la valeur moyenne de celle-ci [°C].

### I. 4. 1 Effet des courants d'air

La perception d'un courant d'air localisé notamment au niveau de la nuque ou du visage est un élément d'inconfort. Cette perception du courant d'air dépend de la vitesse de l'air, de la température de l'air, de la zone du corps concernée.

Les courants d'air provoquent aussi une sensation de froid due à une convection assez importante entre la peau et l'air ambiant. Des courants d'air excessifs en hiver conduisent souvent les occupants à augmenter la température intérieure pour contrecarrer la sensation de froid. La norme recommande une vitesse d'air moyenne inférieure à 0,15 m/s en hiver et à 0,25 m/s en été lors d'un travail sédentaire. (Corinne, M, 1999)

### I. 4. 2 Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique

Les asymétries du rayonnement sont dues, à la présence d'une paroi chaude ou froide telle qu'un plafond ou un plancher chauffant, un vitrage chaud ou froid. En outre, le gradient vertical de température est aussi une source d'inconfort. S'il est suffisamment élevé, il peut apparaître une sensation de chaud au niveau de la tête ou de froid au niveau des pieds, même si le corps est en état d'équilibre thermique. Moujalled (Moujalled, B, 2007) conclut que l'asymétrie de température radiante doit être inférieure à 10°C pour une paroi verticale froide (baie vitrée en hiver), et 5°C pour un plafond chaud (plafond chauffant).

### I. 4. 3 Effet de gradient thermique vertical de l'air

En général, les températures sont plus élevées en hauteur donc au niveau de la tête, La norme admet une différence de température d'air maximum de 3°C entre 0,1 m du sol (niveau des chevilles) et 1,1 m du sol (niveau de la tête chez une personne assise). (Vogt J.J,1995)

### I. 4. 4. Effet de la température du sol

Hoffman J B., (Hoffman J.B, 1994) précise qu'une température de plancher trop élevée ou trop basse entraîne un inconfort au niveau des pieds. Plusieurs auteurs ont effectué des recherches sur ce sujet et selon Olsen BW, (Olsen B.W, 2003) les températures optimales de sol pour les personnes chaussées et à la neutralité thermique sont de 23 °c pour les personnes debout et de 25°c pour les personnes assises, avec un minimum de 6% d'insatisfaits.

D'autres éléments influençant le confort thermique ont été étudiés : l'âge, le sexe, la nourriture, la localisation géographique, la couleur des murs, le bruit, la lumière. Toutefois, il ne peut exister de règles de confort universelles du fait de grandes variations géographiques et intra-individuelles, (Vogt J.J,1995) sauf que les médecins de l'habitat sain proposent les valeurs suivantes pour chaque facteur du confort: (Deoux. S, 2002)

- Température des murs : 22 ± 2°C.
- Humidité relative entre 30 et 70%.
- Température du sol : 19 à 24°C.
- Vitesse de l'air : inférieure à 0,20 m/s.
- Différence de température entre deux murs d'une même pièce doit être inférieure à 10°C
- Différence de température entre le sol et le plafond doit être inférieure à 5°C.

### I. 5 L'influence des différences interindividuelles (Foura Samir, 2007)

Le calcul du confort thermique est fondé essentiellement sur les six paramètres de base (température de l'air, température de rayonnement, humidité de l'air, vitesse de l'air, activité et vêture des sujets). Mais compte tenu de son aspect subjectif, il est normal que le confort thermique soit influencé par des facteurs relatifs aux sujets et à leurs conditions de vie : âge, sexe, origine ethnique, région géographique (climat), acclimatation physiologique, alimentation, etc...

De nombreuses études ont été effectuées afin de déterminer l'influence de ces facteurs sur les conditions de confort thermique. Ces études visent souvent à évaluer ou valider le $P_{MV}$, celui-ci étant l'indice proposé par la norme internationale ISO 7730. Cet indice a été développé à partir des études réalisées dans des chambres climatiques avec des sujets nord-américains et européens, laissant s'installer des doutes quant à son applicabilité sur d'autres populations ayant différentes conditions de vie dans d'autres régions géographiques.

La plupart des études réalisées ont montré que l'influence de ces facteurs est d'une faible magnitude, et que les six paramètres de base suffisent pour calculer les conditions du confort thermique (Parsons, 2003). Si les différences interindividuelles subsistent, elles sont souvent exprimées par l'activité et la vêture des sujets, qui figurent parmi les six paramètres de base. La préférence des ambiances légèrement plus chaudes par les personnes âgées est due à leurs activités sédentaires (Cena, 1986).

La sensibilité des femmes au froid est due à leurs tenues vestimentaires généralement plus légères que les hommes (ASHRAE). Quant à l'acclimatation physiologique, les études menées avec des personnes acclimatées au chaud ou au froid montrent qu'elle n'affecte pas l'acceptabilité et l'inconfort thermique pour les conditions typiques rencontrées dans les logements ou les bureaux (Brager, 1998). Ainsi le $P_{MV}$ (ou le $S_{ET}$) prend en compte ces facteurs indirectement à travers la vêture et l'activité. Par contre, les enquêtes et les études in situ (bâtiment) sur le confort thermique ont révélé un écart entre les réponses subjectives évaluées et celles prévues par les modèles analytiques ($P_{MV}$) surtout dans les bâtiments non climatisés (avec la ventilation naturelle) en période estivale, avec une tendance de surestimation de la sensation de chaleur (Humphreys, 1998); (De Dear, 2002).

Ceci a incité les chercheurs à multiplier les recherches expérimentales sur le confort thermique en ouvrant d'autres horizons sur une nouvelle approche qui consiste à déterminer les conditions de confort thermique à partir des résultats des enquêtes et des études Cette approche, connue sous le nom de l'approche adaptative, suscite actuellement beaucoup d'intérêts ; des réflexions ont été menées afin de l'inclure dans les normes actuelles qui ne sont, pour l'instant, basées que sur les méthodes d'approche analytique.

La méthode adaptative développée dans (standard ASHRAE55, 2004) permet de calculer la température de confort $\mathbf{T_c}$ dans les bâtiments soumis à une ventilation naturelle en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure $T_{O.}$ (Madi, Kaboré, 2015)

$$T_c = 0{,}31\, T_0 + 17{,}8 \qquad \text{(I.51)}$$

Avec :

$T_c$ Température de confort [°C].

$T_O$ Moyenne mensuelle de la température extérieure [°C].

Cette température de confort est la température opérative dans le bâtiment qui prend en compte le rayonnement des parois ainsi que la vitesse de l'air. Le standard ASHRAE 55 (2004) définit une bande de +/- 2,5°C de largeur autour la température de confort pour 90% d'acceptabilité, et de +/-3,5 °C de largeur pour 80% d'acceptabilité.

### I. 6 Diagramme bioclimatique de Givoni

Afin d'évaluer les exigences physiologiques du confort, Baruch Givoni a présenté en 1963 des diagrammes basés sur le diagramme psychrométrique (Attia et Carlucci, 2015), il utilise les caractéristiques principales de l'humidité et de la température de l'air pour évaluer la sensation thermique et le confort des occupants (Castilla et al, 2014). Son objectif principal est de déterminer les conditions microclimatiques à l'intérieur des bâtiments qui permettent aux chercheurs d'évaluer l'énergie de chauffage et de refroidissement nécessaire pour maintenir des conditions du confort adéquates, comme argumenté par Fernández (1994) et (Castilla et al, 2014). Le graphique psychrométrique présenté à la figure I. 9, est considéré comme la meilleure représentation des variables climatiques (Szokolay, 1986). En 1992, Givoni a proposé deux séries de limites pour les pays développés et les pays en développement chauds, avec une élévation suggérée de 2 °K (Givoni, 1992 ). (Attia et Carlucci, 2015). De ce fait, certaines zones de confort hivernal et estival sont superposées sur le diagramme psychométrique commun. Les caractéristiques de ces zones peuvent être observées dans le tableau I. 8.

| Paramètre | Période estivale | Période hivernale |
|---|---|---|
| Température de l'air intérieur [°C] | 23 - 26 | 20 - 24 |
| Humidité relative [%] | 40 - 60 | 40 - 60 |

Tableau I. 10 - : Zones du confort intérieur du diagramme psychométrique (Castilla et al., 2014)

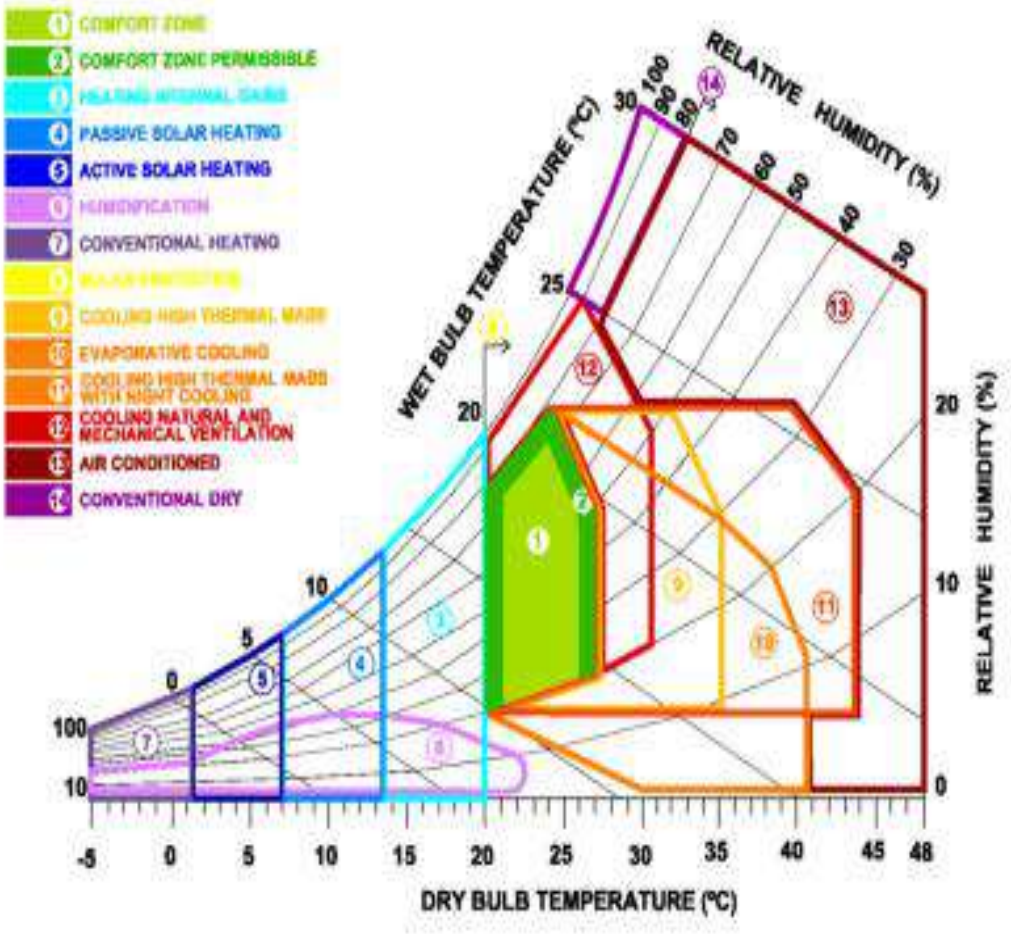



Figure I. 12 - Diagramme psychrométrique adapté de Givoni. (Givoni, 1992) ;( Manzano-Agugliaro et al., 2015)

Enfin, il faut signaler que différents diagrammes bioclimatiques sont utilisés également comme outils afin de déterminer les niveaux du confort, comme les diagrammes développés par Olgyay (1963) et Olgyay (1967) ; le diagramme de Givoni (1992). Les détails sur la méthode de Givoni et celle d'Olgyay sont explicités dans l'étude de Fernández (1994) et le mémoire de magistère de Boulfani (2010).

# CHAPITRE N°II :

# MODÉLISATION DU CONFORT THERMIQUE

## II. 1 Introduction

Le but de ce chapitre est de tenter de cerner les principaux problèmes et l'importance de l'effet du confort thermique dans le bâtiment. De nombreux travaux de recherche ont été menés dans ce domaine dans des chambres climatiques ou in situ, sur des mannequins ou avec des êtres humains ; ces travaux visent à identifier les conditions de confort et d'acceptabilité des ambiances thermiques sans chercher à comprendre les mécanismes mis en jeu. A la suite de ces travaux, plusieurs indices de confort thermique ont été développés en se basant sur des modèles du confort thermique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisis de présenter un projet pilote de construction d'une maison individuelle écologique dotée du confort thermique. La zone ou se localise le projet est située dans la commune de Benchicao à environ 12 kms au Sud du Chef-Lieu de la Wilaya de Médéa avec comme coordonnées : **GPS : 36° 11′ 59″ Nord. 2° 50′ 55″ Est** et une altitude de 1030 m.

## II. 2 - Présentation de la région de Médéa

### II. 2. 1 - Situation géographique

La ville de Médéa est située au Nord de l'Algérie (Figure II. 1), et se trouve située à 88 km de la capitale, Alger. Elle s'étend sur une superficie de 8.775,65 Km².




Figure II. 1 - Situation de la ville de Médéa (Google Mapp, 2008)

Ses coordonnées géographiques sont : latitude Nord 36° 16′ 03″ et longitude Est 2° 45′ 00″.

Cordonnées GPS : 36.2675 Nord, 2.7501 Est

Son altitude est 981 m et s'étend sur une superficie de 8.775,65 Km².

Comme le montre la carte ci-dessous, la Wilaya de Médéa est frontalière avec au Nord la Wilaya de Blida, au Sud la Wilaya de Djelfa, à l'Est les Wilayas de M'sila et de Bouira et à l'Ouest les Wilayas de Ain Defla et de Tissemsilt.




Figure II. 2 - Situation de la wilaya de Médéa (Google Mapp, 2008)

Une telle position stratégique confère à Médéa une zone de transit principale et un trait d'union entre le Tel et le Sahara, d'une part et entre les Hauts Plateaux de l'Est et ceux de l'Ouest, d'autre part. Cette position est renforcée par un important réseau routier qui traverse la Wilaya notamment par la RN n°01 qui va d'Alger au Nord à Tamanrasset au Sud (voir carte ci-dessus).

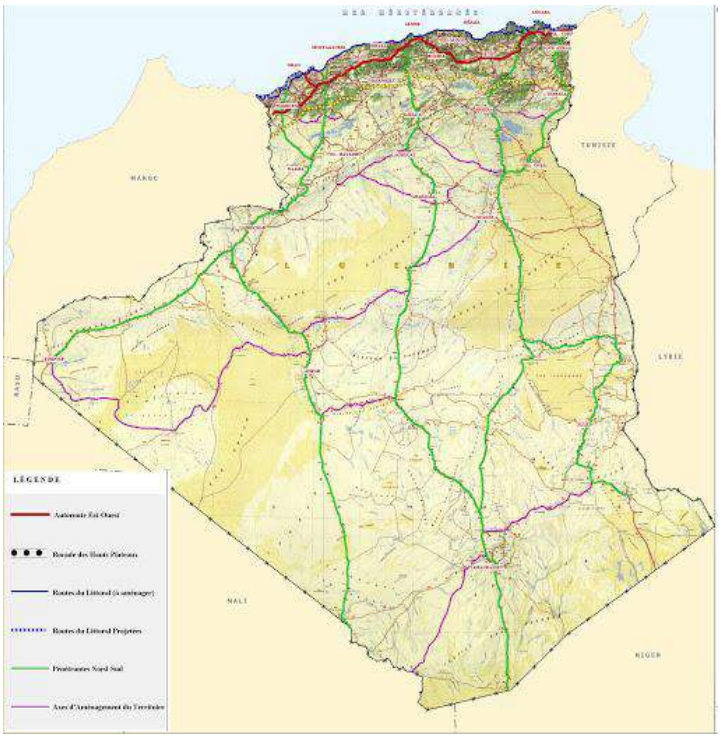


Figure II. 3 – Carte routière Algérie (Site web, Carte-algérie.com)

### II. 2. 2 - Le climat de la ville de Médéa

Le climat de Médéa se distingue par des caractéristiques dues à de nombreux facteurs qui sont entre autres :

- Son altitude qui atteint 1240 m au-dessus du niveau de la mer (sommet de Benchicao).
- Sa position sur les monts de l'Atlas tellien.
- Son exposition aux vents et aux vagues de courants venant de l'Ouest.

Tous ces facteurs ont fait que Médéa dispose d'un climat méditerranéen semi continental, froid et humide en hiver, tempéré au printemps et chaud et sec en été. Médéa reçoit une quantité considérable de pluie atteignant 500 mm par an, avec des précipitations annuelles atteignant 736 mm et la température moyenne annuelle à Médéa est de 14.4 °C.

Particulièrement en décembre, janvier et février, la neige quant à elle, recouvre régulièrement les hauteurs de Benchicao, situées à une altitude de 1240 m.

### II. 2. 3 - Données climatiques de Médéa

Afin de mieux caractériser le climat de la ville de Médéa, il est utile d'analyser les différents paramètres qui le constituent comme : la température, l'humidité, la durée d'insolation, le rayonnement solaire, le vent et les précipitations. Ces données, correspondant à l'année 2019, ont été recueillies au niveau de la station météorologique de Médéa (située à une altitude de 1030 m).

#### II. 2. 3. 1 - Les températures et l'humidité

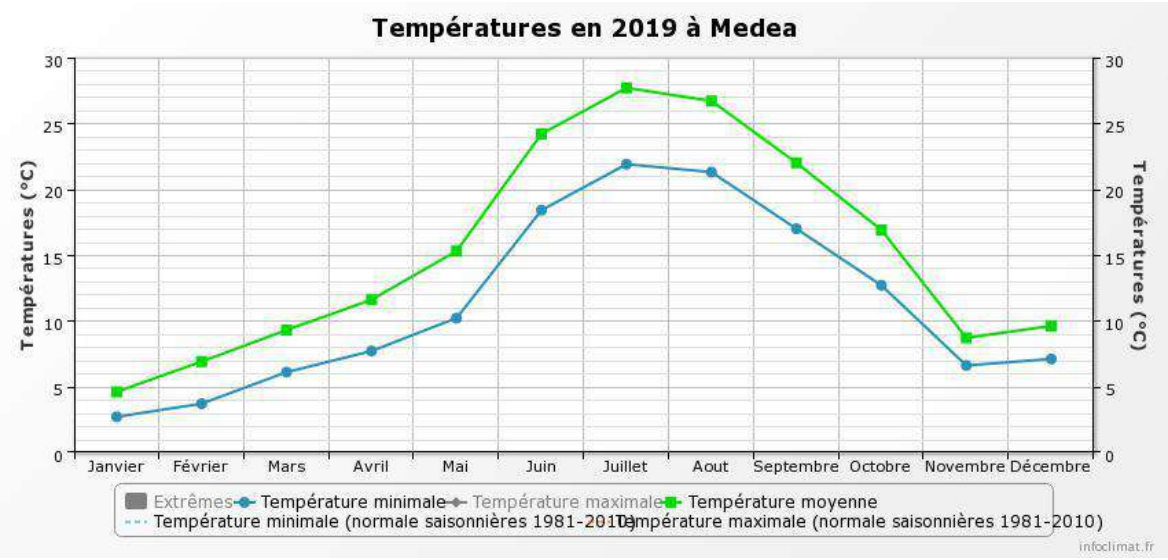



Figure II. 4 - Valeur des températures moyennes mensuelles, pour la période de 2019, (O.N .M de Médéa, 2019).

| **Température C°** | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Jui | Aout | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T° **Moy/max** | 6.6 | 10.2 | 12.7 | 15.5 | 20 .2 | 29.9 | 33.4 | 32 | 27 | 22 | 10.9 | 12.2 |
| T°**Moy/mini** | 2.7 | 3.7 | 6.1 | 7.7 | 10.2 | 18.4 | 21.9 | 21.3 | 17 | 12.7 | 6.6 | 5 |
| Humidité % | 79.7 | 65.1 | 68.6 | 72.7 | 57.9 | 41.5 | 37.8 | 45.6 | 56 | 63.7 | 88.6 | 73.6 |

Tableau II. 1 - Température moyenne quotidienne maximale et minimale, humidité relative de Wilaya de Médéa (O.N.M Médéa, 2019).

Ces données, présentées par des graphes (températures moyennes mensuelles) et par un tableau récapitulatif pour l'humidité et ce pour l'année 2019, (Figure II.4), (Tableau II.1) font ressortir les caractéristiques suivantes :

- **pour les températures on a :**

La saison très chaude dure 2,8 mois, du 17 juin au 11 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 28 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 3 août, avec une température moyenne maximale de 32 °C et minimale de 18 °C.

La saison fraîche dure 4,1 mois, du 17 novembre au 20 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 16 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 20 janvier, avec une température moyenne minimale de 1 °C et maximale de 11 °C (Figure II.4). La température moyenne annuelle est de 15.8°C.

- **pour l'humidité on a :**

La valeur moyenne de l'humidité dépasse les 36 % pour tous les mois de l'année et varie entre un maximum de 88.6 % au mois de Novembre et un minimum de 37.8 % au mois de Juillet (Tableau II.1). L'humidité relative moyenne annuelle est de 62.5%.

Nous estimons le niveau de confort selon l'humidité sur le point de rosée, car il détermine si la transpiration s'évaporera de la peau, causant ainsi un rafraîchissement de l'organisme. Les points de rosée plus bas sont ressentis comme un environnement plus sec et les points de rosée plus haut comme un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui varie généralement considérablement entre le jour et la nuit, les points de rosée varient plus lentement. Ainsi, bien que la température puisse chuter la nuit, une journée lourde est généralement suivie d'une nuit lourde.

### II. 2. 3. 2 - Rayonnement solaire et la durée d'insolation

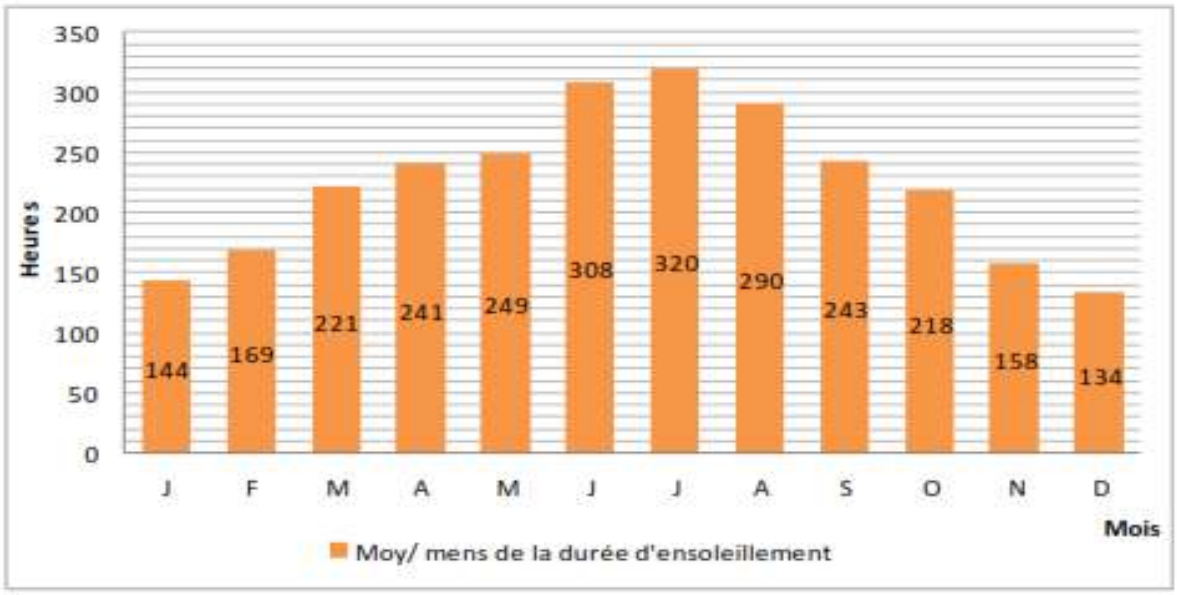



Figure II. 5 - Durée mensuelles d'insolation à Médéa (O.N.M Médéa, 2019).

| | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov | Déc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rayonnement solaire incident kWh | 3 | 3.5 | 5.2 | 6.3 | 6.8 | 7.9 | 7.5 | 6.8 | 6.2 | 3.5 | 3 | 2.5 |

Tableau II. 2 - Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen (O.N.M Médéa, 2019).

Selon la (figure II. 5), le mois de janvier présente une durée d'ensoleillement la moins importante (en moyenne 144 heures), tandis que le mois de juillet est le mois le plus ensoleillé de l'année (en moyenne 320 heures). Nous constatons également que le nombre d'heures d'ensoleillement au cours de l'année est très important, soit 2675,6 heures en moyenne par an, ou bien 112 jours par an : ce qui représente à peu près le tiers de l'année.

Ainsi, la durée d'ensoleillement enregistrée, nous indique l'importance du rayonnement solaire direct dans la région de Médéa. Cette présence marquée tout au long de l'année (environs 112 jours par an) doit être prise en considération lors de la conception d'un projet architectural afin d'empêcher d'éventuels problèmes de surchauffe et ce, en prévoyant des protections solaires par exemple. Aussi cette énergie solaire peut être considérée comme source d'énergie gratuite pour un chauffage solaire passif en hiver.

Cette section traite du rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien total atteignant la surface du sol sur une zone étendue, en tenant pleinement compte des variations saisonnières sur la longueur du jour, de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, de l'absorption par les nuages et d'autres composantes atmosphériques. Le rayonnement en ondes courtes inclut la lumière visible et le rayonnement ultraviolet.

D'après le (Tableau II. 2) on constate que le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière extrême au cours de l'année. La période la plus lumineuse de l'année dure 3,4 mois, du 07 mai au 19 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 6,8 kWh. Le jour le plus lumineux de l'année est le 28 juin, avec une moyenne de 7,9 kWh.

La période la plus sombre de l'année dure 3,4 mois, du 30 octobre au 11 février, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré inférieur à 3,5 kWh. Le jour le plus sombre de l'année est le 16 décembre, avec une moyenne de 2,4 kWh. Le total des rayonnements solaire incident en ondes courtes annuelles est de 5.19 kWh.

### II. 2. 3. 3 - Les précipitations

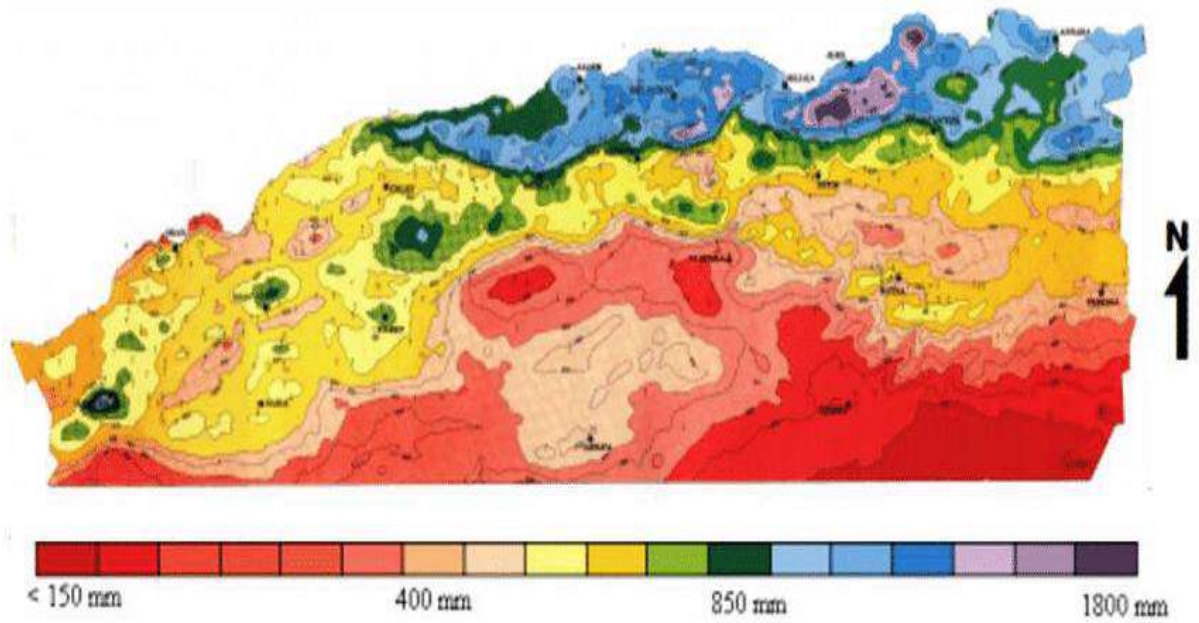



Figure II. 6 - Carte des précipitations du Nord de l'Algérie, (ANRH, 1993)

La carte des précipitations moyennes du Nord de l'Algérie (figure II.6) montre que la Wilaya de Médéa est parcourue par quatre plages de précipitations : celle de 600 à 700 mm au Nord, celles de 395 à 593 mm et de 296 à 395 mm au Centre et celle de – 200 mm à son extrémité Sud.

La répartition annuelle des précipitations à Médéa (figure II.7) est marquée par une période de sécheresse en mois de Juin et une courte sécheresse en mois de Juillet et août, durant laquelle les précipitations sont très faibles et tombent souvent sous forme d'orage.

La période pluvieuse s'étend du mois de novembre au mois d'avril. Les mois de décembre et novembre étant les mois les plus pluvieux avec des quantités moyennes de 165 à 180 mm et le mois de juin est le plus sec avec une valeur moyenne de 00mm.

Le total des précipitations annuelles est de 690.58 mm.

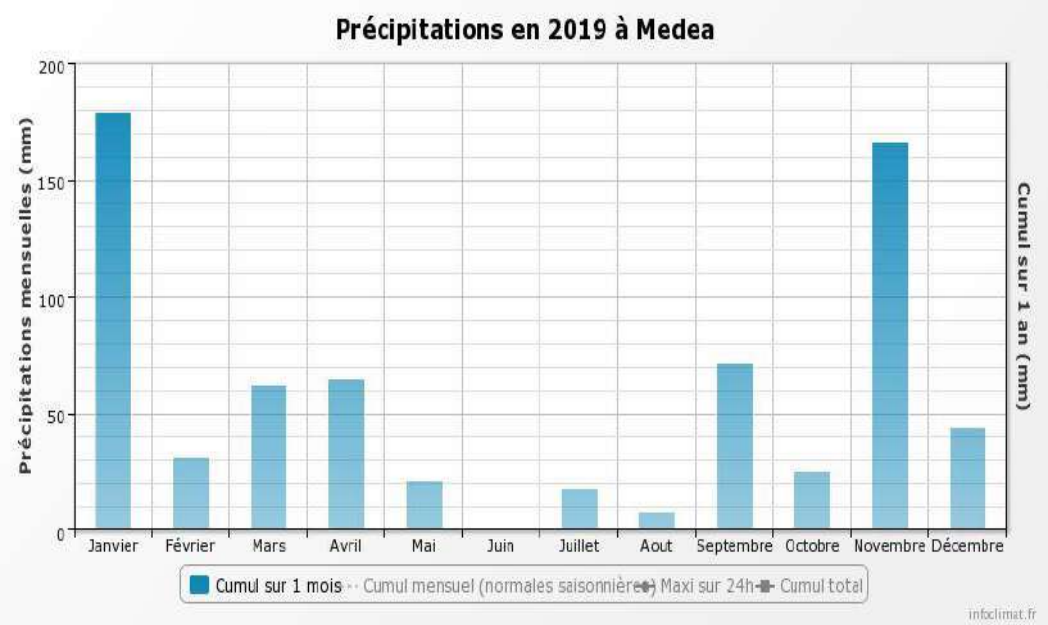



Figure II. 7 - Valeur des précipitations moyennes mensuelles de 2019, (O.N.M Médéa, 2019).

### II. 2. 3. 4 - Pression de l'air et vitesse moyenne du vent

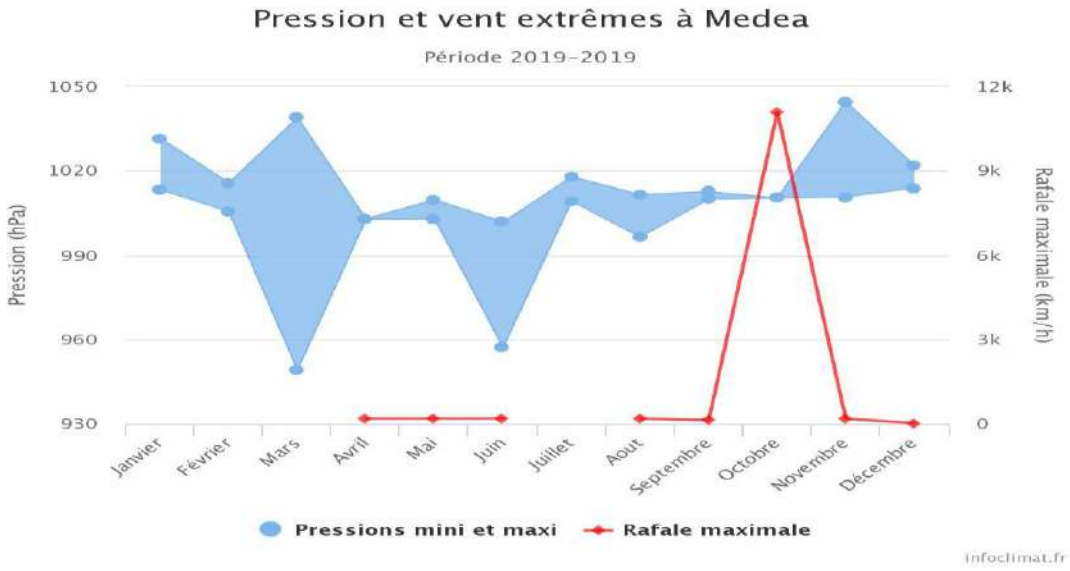



Figure II. 8 - Pression de l'air et la vitesse de vent mensuelle (ONM Médéa, 2019).

Les pressions d'air moyennes maximales sont enregistrées en mois de Mars (1040 hpa) et mois de Novembre (1048 hpa), alors que les valeurs minimales sont enregistrées au mois de Mars (950 hpa) et au mois de Juin (958) hpa.

| **Vitesse de vent moy km/h** | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | | Juin | Juil | Aout | | Sep | | Oct | Nov | Déc | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **V vent moy** | 12.1 | 8.5 | 8 | 9.6 | 10 | | 9.6 | 9.6 | 8.5 | | 9.3 | | 8.4 | 15.2 | 11.2 | |
| **V vent max** | 19.4 | 13.4 | 14 | 15.8 | 15.3 | | 15.6 | 16 .5 | 13.9 | | 15.1 | | 13.9 | 21.9 | 17.7 | |
| **Direction de vent** | O | O | O | O | O le18 Mai | N | N | N | N Est Début Aout | N | N Le 23 Sep | O | O | O | SO Début Déc | O |

Tableau II. 3 - La vitesse et la direction de vent moyenne de W.Médéa (station O.N.M de Médéa, 2019).

Avec :

O Direction de vent Ouest.

N Direction de vent Nord.

Est Direction de vent Est.

S Direction de vent Sud.

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs ; la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

Les vents qui prédominent à Médéa sont de direction Ouest en hiver et Nord en été.

- La vitesse horaire moyenne du vent à Médéa connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 6,0 mois, du 28 octobre au 29 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 11,5 km/h (3.05 m/s). Le jour le plus venteux de l'année est le 23 décembre, avec une vitesse moyenne du vent de 12,9 km/h (3.33 m/s).

La période la plus calme de l'année dure 6,0 mois, du 29 avril au 28 octobre. Le jour le plus calme de l'année est le 09 juin, avec une vitesse moyenne horaire du vent de 10,1 km/h.

➢ La direction horaire moyenne principale du vent à Médéa varie au cours de l'année. Le vent vient du Nord pendant 4,2 mois, du 18 mai au 23 septembre, avec un pourcentage maximal de 40 % le 06 août. Il vient de l'Ouest pendant 7,8 mois, du 23 septembre au 18 mai, avec un pourcentage maximal de 43 % le 01 janvier.

On peut utiliser le vent comme moyen de rafraîchissement passif des espaces intérieurs durant la nuit. Pendant le jour, il servira à la ventilation naturelle.

### II. 2. 3. 5 - Les totaux annuels des données climatiques de Médéa

| Données climatiques | Temp °C | Humidité % | Vitesse de Vent km/h | Rayonnement solaire kWh | Insolation h /ans | Précipitation En mm | Pression d'air hpa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15.8 | 62.5 | 12.7 | 5.19 | 2675 | 690.58 | 1105.58 |

Tableau II. 4 - Total annuelles pour les données climatiques de la wilaya de Médéa (station O.N.M de Médéa, 2019).

### II. 2. 3. 6 - Conclusion de l'analyse climatique

A partir de l'analyse climatique effectuée, il s'avère essentiel de prendre le climat en considération lors du processus de conception et de réalisation du projet de construction d'une maison pilote écologique dotée d'un système de confort thermique. La diversité du climat à travers notre pays impose une diversité architecturale. Cette dernière doit répondre en premier lieu à des besoins thermiques spécifiques de chaque zone climatique, et doit servir en second lieu à contribuer à la détermination des caractéristiques spécifiques architecturales.

Le climat de la ville de Médéa peut être identifié selon des aspects qualitatifs mais peut être apprécié grâce à des données quantitatives par rapport à la durée d'insolation de la ville de Médéa.

La région de Médéa est caractérisée par un climat méditerranéen semi continental, froid et humide en hiver, tempéré au printemps et chaud et sec en été, dégagé dans l'ensemble avec des radiations solaires intenses et une température de l'air variant généralement de +1 C° à 32 C° et est rarement inférieure à -3 C° ou supérieure à 36 C°

D'après cette analyse du climat de Médéa, nous pouvons constater que la période la plus favorable pour la prise de températures dans le cas d'étude correspond aux mois de juillet et Août pour l'été et les mois de décembre ou janvier pour l'hiver.

## II. 3 - Présentation du modèle du bâtiment

### II. 3. 1 - Présentation du modèle d'étude

Nous avons choisis comme modèle d'étude, la réalisation d'un projet pilote de construction d'une maison individuelle écologique. Virtuellement cette maison se situe dans la commune de Benchicao qui se trouve à environ 12 kilomètres au Sud du Chef-Lieu de la Wilaya de Médéa, avec une altitude de 1030 m.

Le choix d'une maison individuelle écologique est fait pour plusieurs raisons notamment celui du fait que la maison écologique n'est ni un label ni une norme reconnue par quelque organisme public que ce soit. Il s'agit d'un type d'habitat qui se donne pour objectif de produire de l'énergie renouvelable, sans pour autant que la consommation d'énergie diminue. On peut cependant définir plusieurs critères qui permettent de dénommer comme telle une maison écologique :

- ✓ une composition à partir de matériaux naturels et locaux
- ✓ le recours à des sources d'énergie propre et en particulier l'énergie solaire
- ✓ La prise en compte de la topographie, de l'ensoleillement et des vents



Figure II. 9 - Situation du bâtiment de cas d'étude dans son contexte immédiat (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020)

#### II. 3. 1. 1 - Démarches de conception de l'enveloppe du bâtiment d'un point de vue énergétique et écologique

La réalisation d'un bâtiment implique non seulement une réflexion sur la conception de sa structure afin de répondre aux exigences mécaniques, mais également de son enveloppe afin de répondre aux exigences éco-thermiques liées au confort des futurs occupants de ce bâtiment.

Du point de vue thermique et écologique, ce bâtiment va devoir répondre aux ~~à~~ fonctions principales suivantes :

- Permettre le confort thermique des occupants, quelles que soient leurs activités, liées au local dans lequel ils se trouvent ($C_{onfort\ salle\ de\ bains)}$. $\approx 23$ [°C], $C_{onfort\ séjour} \approx 18$ [°C]

$$\mathbf{C_{onfort\ au\ repos} > C_{onfort\ en\ activité}}$$

- Choisir et utiliser des matériaux de construction naturels et recyclables.
- Recourir à des sources d'énergie propre et renouvelable pour réduire les émissions de $CO_2$ et préserver ainsi l'environnement.
- Concevoir la maison écologique d'une telle manière qu'elle dispose de réseaux nécessaires au confort tout en veillant à réduire les consommations d'énergie. En effet ces ressources se raréfient et ont un coût pour la société et donc pour l'habitat.
- Equiper la maison d'éléments indispensables pour l'adapter au climat des saisons en utilisant l'énergie solaire.
- Côté confort, on peut aussi l'optimiser grâce à l'aménagement d'un système informatique et électronique couplé avec les équipements domestiques traditionnels pour commander et intervenir à distance sur les appareillages de confort pour limiter les surconsommations d'énergie. Il peut être affecté au pilotage de l'éclairage ou de la température des pièces à distance.

### II. 3. 1. 1. 1 - Conception du bâtiment écologique

**La** technique de construction en bois est la plus répandue dans le monde. Elle s'appuie sur une structure formée de pièces en bois, espacées d'environ 50 cm, entre lesquelles seront insérés des matériaux isolants, les matériaux d'isolation écologique possèdent des qualités isolantes thermiques et acoustiques très performantes et ils régulent l'humidité et la chaleur des pièces pour une atmosphère toujours plus saine.

Le squelette est recouvert à l'extérieur d'un écran d'étanchéité à l'eau et d'un revêtement extérieur par bardage en bois, et à l'intérieur d'une étanchéité à la vapeur et d'une isolation phonique et d'un revêtement de finition (exemple : plaques en plâtre). Ces différentes couches permettent de renforcer la résistance de la structure aux aléas climatiques et à l'isolation thermique.

Ce type de construction a comme principe d'éliminer l'option utilisation des autres énergies pour assurer le confort dans la demeure. Cette dernière a la capacité de capter, de stocker puis de transformer et de propager dans son intérieur toute l'énergie naturelle qu'elle saisit grâce à l'ensemble de son mode de création. Il s'agit ici de son orientation qui se fait généralement au Sud, des matériaux utilisés, de l'écosystème qui l'entoure, ainsi que de sa localisation.

Le fondement des maisons adaptées à l'environnement est d'assurer le bien-être à leurs occupants, même pendant la saison froide. Ainsi, les méfaits des vents y sont réduits grâce à l'agencement particulier qui est effectué pour toutes les pièces.

La maison écologique doit respecter **quatre éléments fondamentaux** pour être considérée comme telle. **(**site web : https://alternativi.fr/maison-ecologique-quels-materiaux-et-equipements-choisir/95**)**

- Réaliser des **travaux respectueux de l'environnement** en utilisant le moins d'énergie possible pour la construction,
- Utiliser des **matériaux écologiques, principalement naturels et locaux** dans la mesure du possible,
- Utiliser **l'environnement et le climat pour orienter la maison** afin d'éviter le recours à un apport énergétique supplémentaire,
- Une **isolation et des ventilations naturelles** et optimales.

### II. 3. 1. 1. 1. 1 - Description du modèle

Notre maison pilote est à ossature en bois avec comme dimensionnements 45 x 145 mm. Ils doivent être isolés avec de la fibre en bois de conductivité thermiques de 0,038 W/ m² K et de résistance thermique égale à 5,26 m² K/W et 8.4 m² K/W respectivement pour les murs extérieurs et le toit. (Site web : isolant Fibre de Bois :, *https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de bois.php*.

Les dimensions de la maison sont de 29,254 m x 12,917 m. Le types de revêtement extérieur installé est constitué de planches de bardage de 20 mm, à qui on applique un mélange de finition constitué de peinture de bois (choix de peinture de couleur blanche) et de saturateur et ce, afin de protéger les murs extérieurs. La maison comporte deux étages, et un sous-sol.

**Le sous-sol comprend :**

- Un garage pour au moins 5 voitures.
- Zone de lavage et traitement de linges, vêtements, etc...
- Une zone technique pour l'aspiration centrale de la maison.
- Zone des poubelles et zone d'atelier pour l'entretien de la maison.

**Les pièces du rez-de-chaussée (RDC) sont :**

- Hall d'entrée avec double pied droit.
- Cuisine avec 3 zones (confection de manger, stockage et petit déjeuner).
- Salle pour manger proche de la cuisine avec une surface d'environ 40 $m^2$.
- Salon avec belle vue sur le jardin, 40 $m^2$.
- Salon privé et Bureau, proches du hall d'entrée avec 30 $m^2$.
- 4 chambres suites (avec WC, armoire et zone petit déjeuner) 30 $m^2$, avec un accès par le hall d'entrée et donnant directement à l'extérieur.

**Les pièces du 1er étage sont :**

- Chambre de 30 $m^2$ avec accès à un grand balcon ou terrasse.
- Dressing de 30 $m^2$.
- WC de 20 $m^2$ (2 douches, 1 grand baignoire (2 personnes), 2 sanitaires, 2 lavabos, zone de coiffure).
- 1 kitchenette complète 15 $m^2$.
- 1 bureau, salon de 30 $m^2$.



Figure II. 10- Construction d'une maison par ossature en bois, (Site web, www.travaux-maconnerie.etapes-construction-maison-)

### i/ Les plans architecturaux du modèle

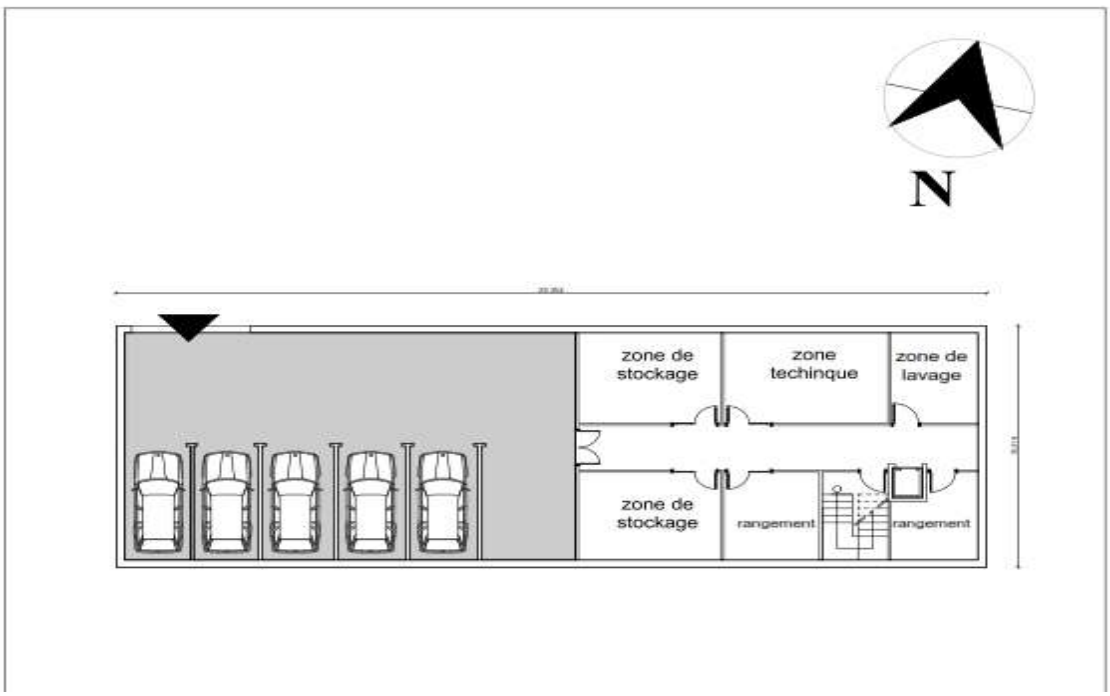



Figure II. 11 - Vue en plan le sous-sol, (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020).

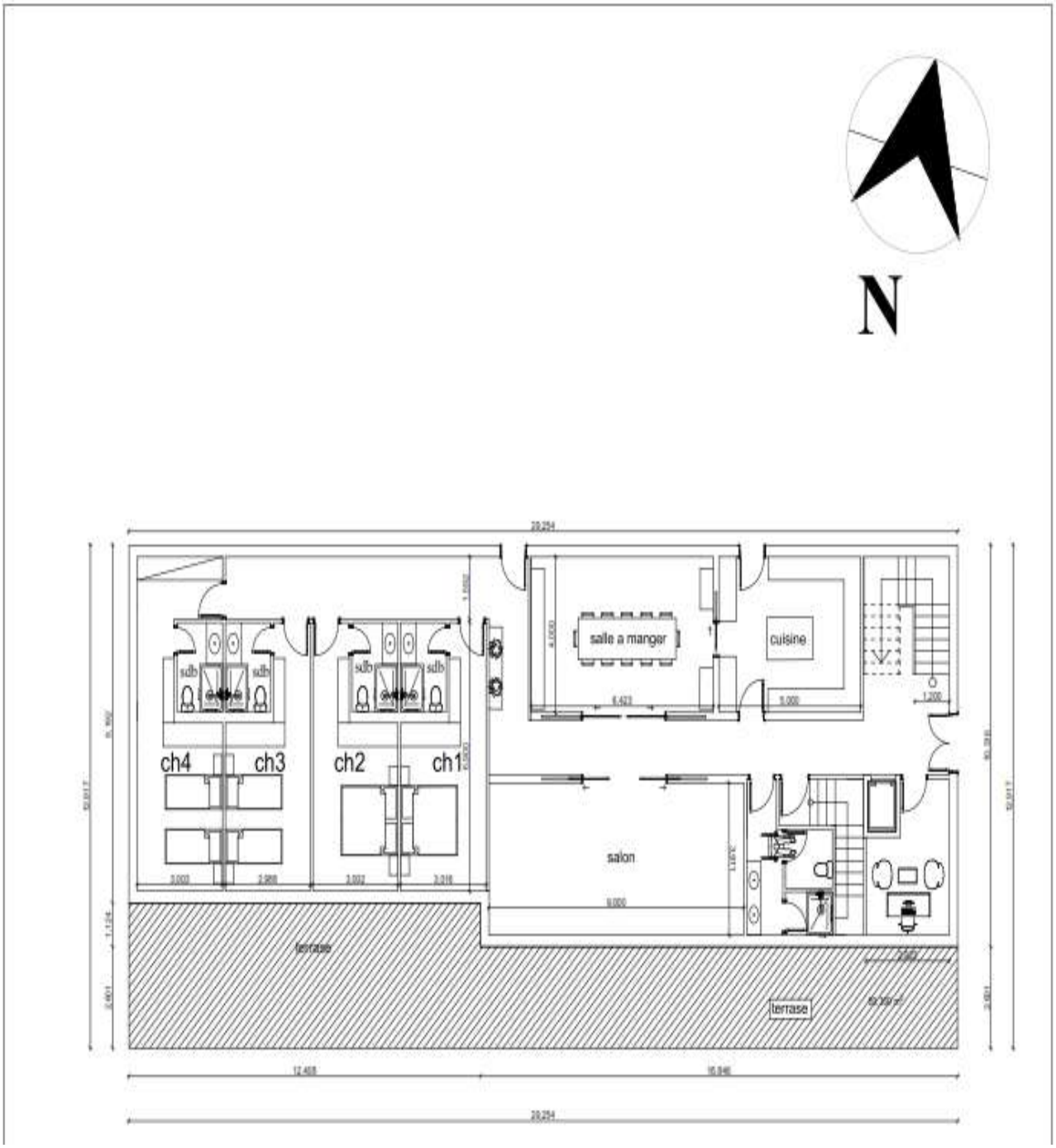



Figure II. 12 - Vue en plan de rez-de-chaussée RDC, (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020).

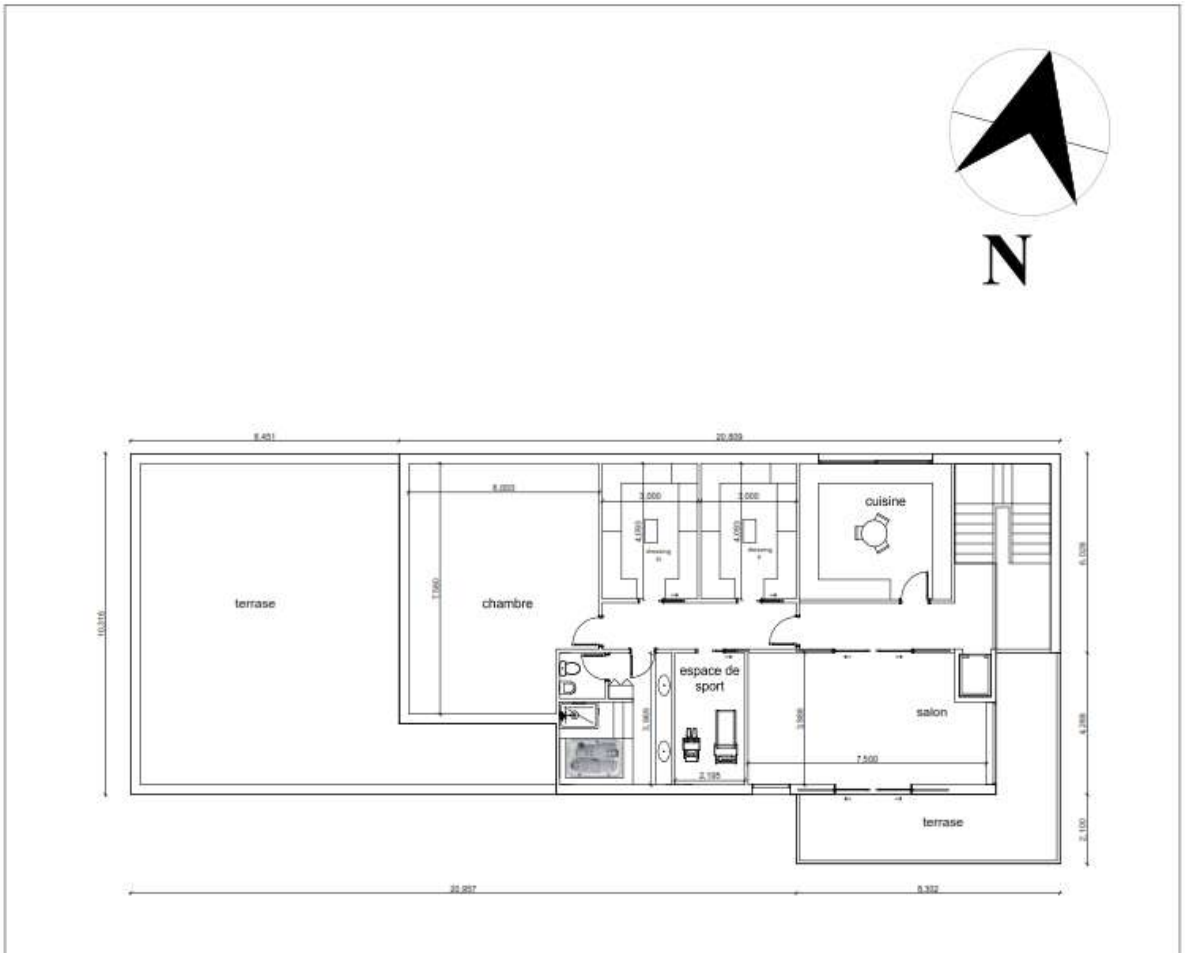



Figure II. 13 - Vue en plan de 1er étage, (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020).

### II. 3. 1. 1. 2 - Matériaux de construction d'une maison écologique

La réussite d'une maison écologique repose sur ses matériaux. Pour exploiter au mieux les apports solaires passifs et le rafraîchissement naturel, l'habitat doit disposer d'une isolation irréprochable. Tous les matériaux ne se valent pas : ainsi certains seront capables de jouer un rôle structurel mais réclameront une isolation supplémentaire qu'il faudra choisir soigneusement afin qu'elle soit aussi efficace que saine (voir figures II 14 et 15). Avant de choisir un matériau plutôt qu'un autre, il est souhaitable de comparer leurs capacités thermiques, garanties des capacités à stocker de l'énergie et donc de l'inertie du mur à venir. Dernier paramètre à étudier, le déphasage. Les principaux critères de choix d'un matériau plutôt qu'un autre sont la densité, le coefficient de conductivité, la résistance, etc... Pour la protection et l'entretien du bois d'une maison bioclimatique, il est cohérent de privilégier des produits moins nocifs pour la santé et pour l'environnement. Le bois nécessite une protection et de l'entretient de l'intérieur et de l'extérieur, pour les façades et les parois, surtout pour le bois de structure (si la poutre supporte un plancher, par exemple). (Site web : *https://www.produits-traitement-bois.com/*)



Figure II. 14 : Isolant fibre en bois en panneaux



Figure II. 15 : Soufflage isolant fibre dans la toiture perdue (Site web : *https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de bois).*

### II. 3. 1. 1. 2. 1 - Composition des parois :

Le Tableau II. 5, présente la composition des parois extérieures et intérieures de l'enveloppe et les caractéristiques des matériaux utilisés pour les parois.

| Parois | Figure | Description matériau | $R_{SI}$ résistance thermique $m^2K/W$ | Coefficient acoustique $R_w$ dB[28] |
|---|---|---|---|---|
| Mur de fondation | **Voir (figure II.16)** | ▪ Plaque de plâtre<br>▪ Lame d'air intérieure<br>▪ Film de polyéthylène<br>▪ Panneau isolant<br>▪ Béton<br>▪ Crépi (au-dessus du sol)<br>▪ Enduit bitumineux<br>▪ Panneau de drainage<br>▪ Remblai | 2.28<br>1.02<br><br><br>2.37<br><br><br>0.57 | 30 |
| Mur extérieur |  | ▪ Les planches de bardage<br>▪ Les lattes vide d'air<br>▪ Pare pluie<br>▪ L'ossature bois 45x145 mm<br>▪ Isolant fibre de bois 150mm<br>▪ Pare vapeur<br>▪ Isolation thermique 50mm<br>▪ La plaque plâtre | Résistance thermique résultant égal à<br><br>5.26 | 30 |

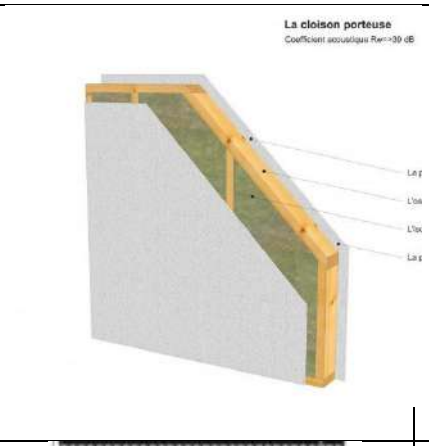
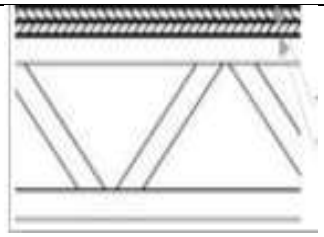
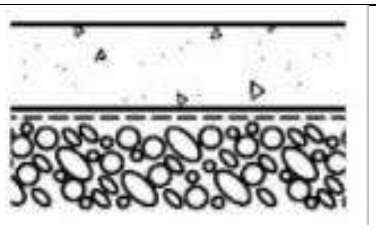
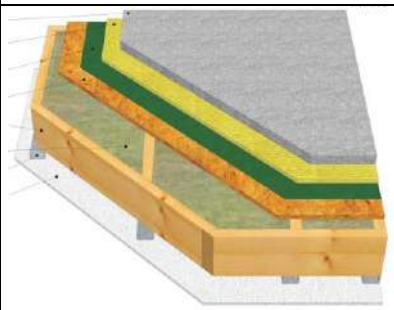
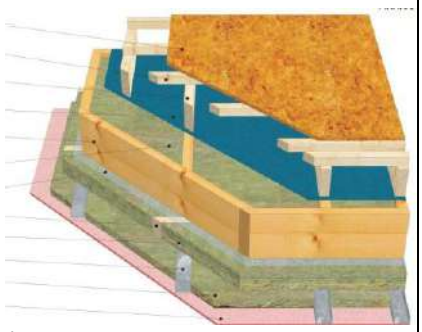
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Mur intérieur |  | ▪ la plaque plâtre<br>▪ L'ossature bois<br>▪ isolation phonique<br>▪ la plaque plâtre | Résistance thermique résultant égal à<br><br>4 | 53 |
| Plancher RDC |  | • Solives ajourées (air)<br>• Contreplaqué<br>• Contreplaqué verni et ciment (CU)<br>• Céramique (CU) | Résistance thermique résultant égal à<br><br>2.99 | 30 |
| Plancher Sous sol |  | • Dalle de béton<br>• Membrane d'imperméabilisation<br>• isolation PU<br><br>• Pierre concassée<br>• Membrane géotextile<br>• la chape | 0.1<br><br>3.63 | 51 |
| Plancher Etage |  | •La chape<br>•isolation acoustique<br>• Imperméable à l'eau<br>• OSB 3<br>• l'ossature bois<br>• isolation phonique<br>• Plaque de plâtre | Résistance thermique résultant égal à<br><br>4.15 | 53 |
| Toit plat | <br>* | ▪ OSB 3<br>▪ Les lattes vide d'air<br>▪ La membrane pare pluie<br>▪ L'ossature bois 45x145 mm<br>▪ Isolant fibre de bois 250mm<br>▪ La membrane pare vapeur<br>▪ Isolation thermique 150mm<br>▪ La plaque plâtre | Résistance thermique résultant égal à<br><br>8.4 | 30 |

Tableau II. 5- présente la composition des parois extérieures et intérieures de l'enveloppe

(Site Web : information technique sur les parois en ossature de bois *http://www.forho.fr/information-technique/#tab-1462776582182-4-4*)

Avec :

**Coefficient acoustique $R_w$** d'affaiblissement acoustique des parois en **dB.**

**OSB 3** Panneau OSB 3, 3 plis épicéa naturel, Ep.12 mm x L.250x l.125 cm ; il a une bonne isolation thermique et phonique et il est écologique grâce à sa colle sans formaldéhyde.

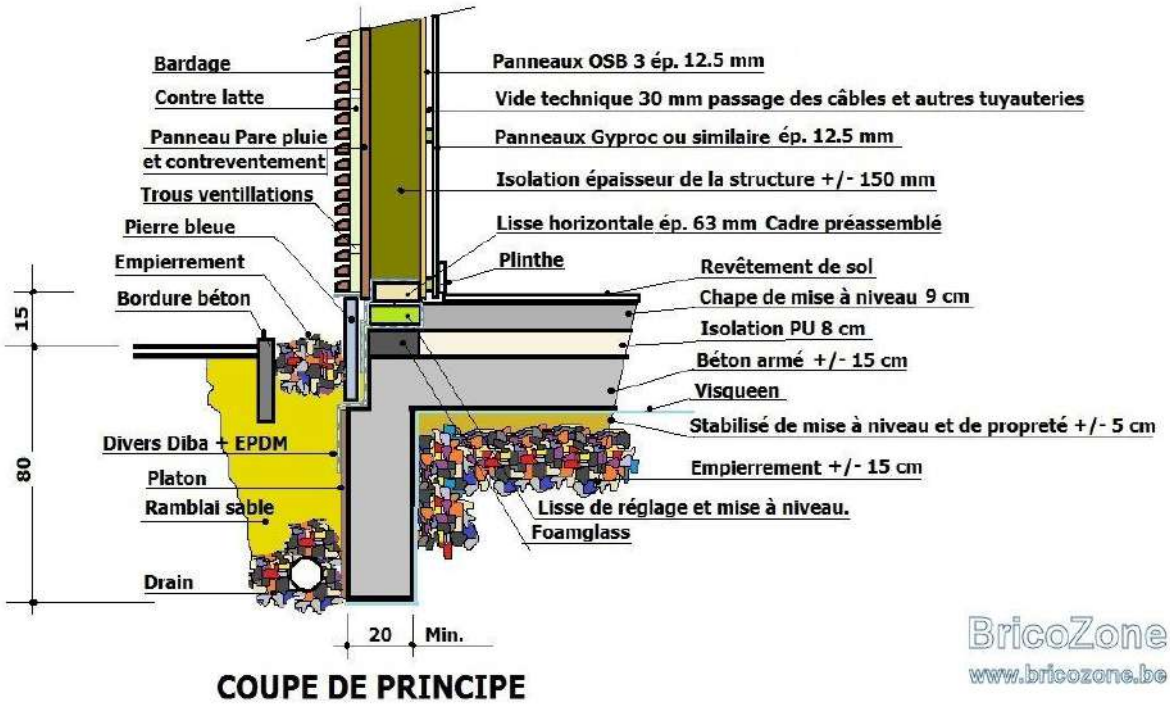



Figure II. 16 - Mur de fondation et du plancher du sous-sol (dalle de béton), (Site Web : mur de fondation et plancher de sous-sol dalle en béton, www.Bricozone.be )

### II. 3. 1. 1. 2. 2 - Produit utilisé pour la protection et l'entretien des parois en bois

Pour la protection et l'entretien des parois de notre maison pilote on a choisi deux produit à appliquer sur les structure et les parois en bois, à savoir :

- A l'intérieur, pour un plancher brut en mélèze de 15 mm d'épaisseur, c'est l'huile naturelle Perl 'Oléo' Parquet qui a été choisie. Formulée sans COV, cette huile contient essentiellement des composés d'origine végétale (huiles végétales, dérivés oléagineux et adjuvants naturels).
- A l'extérieur, pour les surfaces des planches de bardage en mélèze, un produit d'imprégnation acrylique (à base d'eau) a été appliqué, il s'agit du saturateur Coriwood HUV Hydro, en teinte Chêne clair.

Du point de vue esthétique on a choisi de marier deux types de finition, une peinture pour le bois (peinture de couleur blanche) et un saturateur, (Produit de la protection et l'entretien des parois en bois *https://www.produits-traitement-bois.com/*).

### II. 3. 1. 1. 3 - Implantation du bâtiment : (Foura Samir, 2007)

La première étape de construction d'une maison écologie est de bien choisir le lieu d'implantation et de tenir compte des contraintes et des atouts de l'environnement. Il faut veiller à analyser la qualité des sols, à tenir compte des caractéristiques topographiques du site, telles que la hauteur du site, le pourcentage de pente, des données climatiques : le niveau et les variations de températures, les horaires d'ensoleillement, de brumes et de brouillard, la pluviométrie et l'humidité, les masques et les éléments proches (végétation, urbanisme) ou lointains (montagnes, mer) susceptibles de réduire l'insolation du bâtiment. (Figure II. 17 Implantation du bâtiment) (Givoni.B, 1978) et de bénéficier au maximum du rayonnement solaire. Dans la mesure du possible, nous choisirons un terrain permettant d'avoir une façade principale orientée vers le Sud, et assez dégagée.

Un terrain dont l'axe Est-Ouest est plus long est préférable, car il permet d'avoir une façade Sud de plus grande surface. Ensuite le choix d'implantation du bâti par rapport au terrain. Ce choix d'implantation doit être particulièrement bien pensé car il influe directement sur le confort thermique du bâtiment, à cause de son incidence sur le rapport au soleil et aux vents dominants, ainsi que sur la forme globale du bâtiment.

La démarche bioclimatique incite à concevoir une maison en fonction de son terrain pour une raison simple : la rendre la plus économique possible. Un ensemble de paramètres est donc pris en compte pour optimiser son implantation.

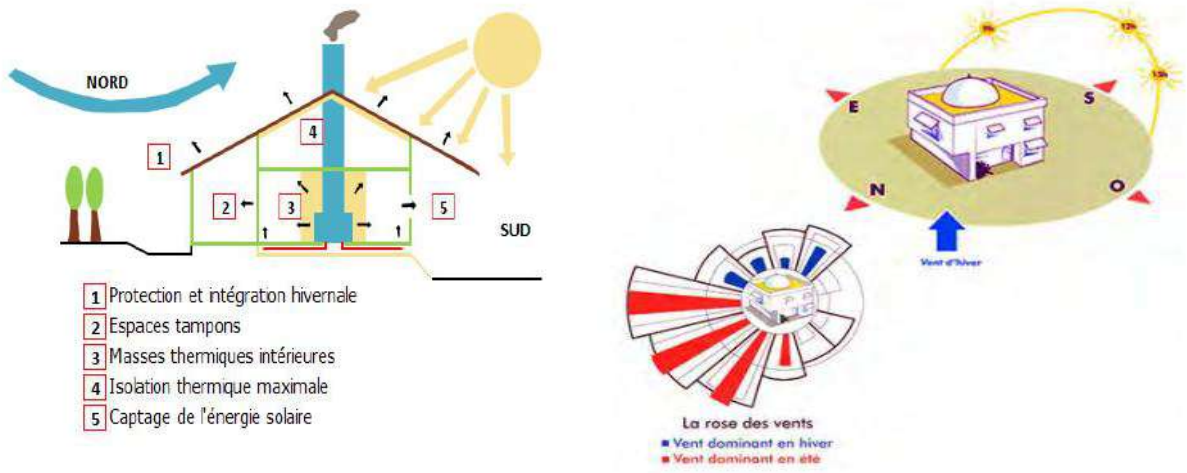


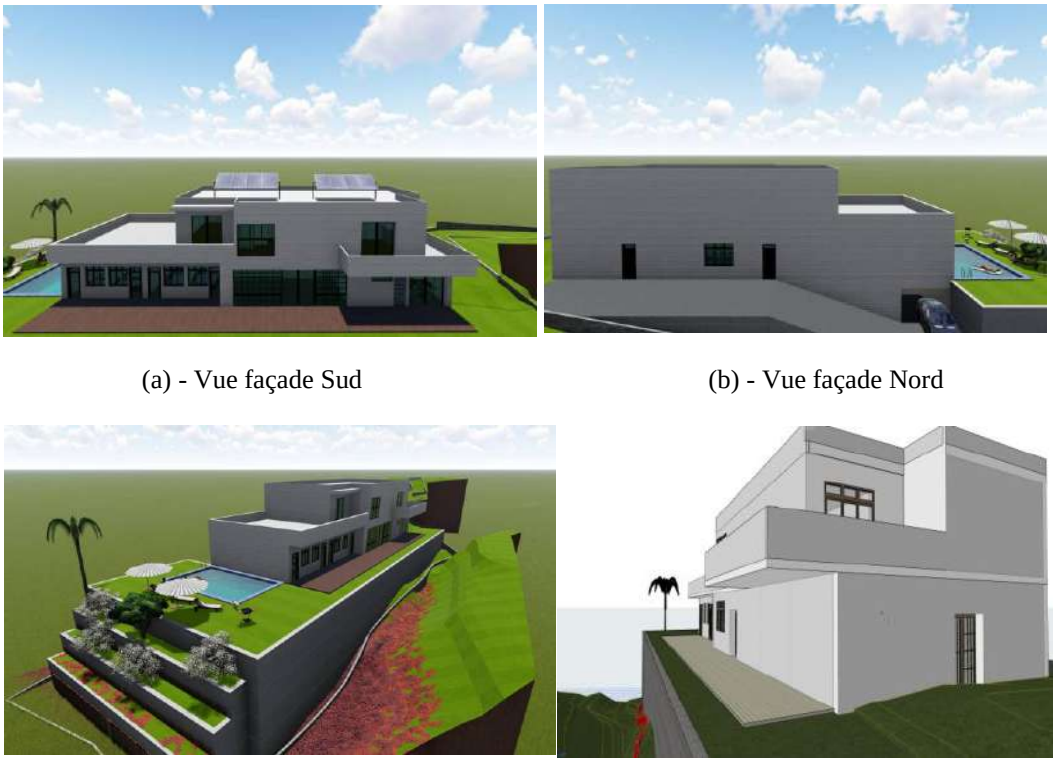

Figure II. 17 - Implantation du bâtiment et un schéma de l'intégration de l'habitat dans le paysage (Foura Samir, 2007).

### II. 3. 1. 1. 4 - Orientation et ensoleillement du bâti

La façade Sud étant la plus agréable du point de vue thermique (chaude en hiver, fraîche en été). L'été, il s'agit de limiter les apports solaires et d'évacuer la chaleur, alors que l'hiver, il convient de profiter au maximum des apports solaires, et de se protéger des vents dominants.

De façon générale, il est préférable d'avoir une exposition principale au Sud à toute autre exposition, car c'est la seule à être à la fois avantageuse en été comme en hiver. En outre, une orientation Sud apporte évidemment un éclairage satisfaisant, dans la mesure ou la maison est éclairée naturellement aux heures les plus intéressantes de la journée (à midi et l'après-midi), ce qui garantit en plus des économies de chauffage et d'éclairage.

Les expositions principales Ouest et Est sont à éviter, car les rayons du soleil frappent de plein fouet (avec un petit angle d'incidence) les ouvertures, qui sont alors difficiles à protéger. Ceci est particulièrement dérangeant durant l'été, surtout pour l'exposition Ouest car les rayons solaires arrivent au moment le plus chaud de la journée. L'orientation du bâti doit être prise de manière à avoir des parois aussi étanches que possible à l'air, et de minimiser également l'effet des vents indésirables (vents froids d'hiver et vents chauds d'été) (Figure II. 18 - Orientation du bâti et Figure II-19 : schéma de la frappe des rayons du soleil).



(a) - Vue façade Sud (b) - Vue façade Nord

(c) - Vue façade Ouest (d) - Vue façade Est

Figure II. 18 - Orientation du bâti (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020).

**i/ Schémas de la frappe des rayons du soleil**

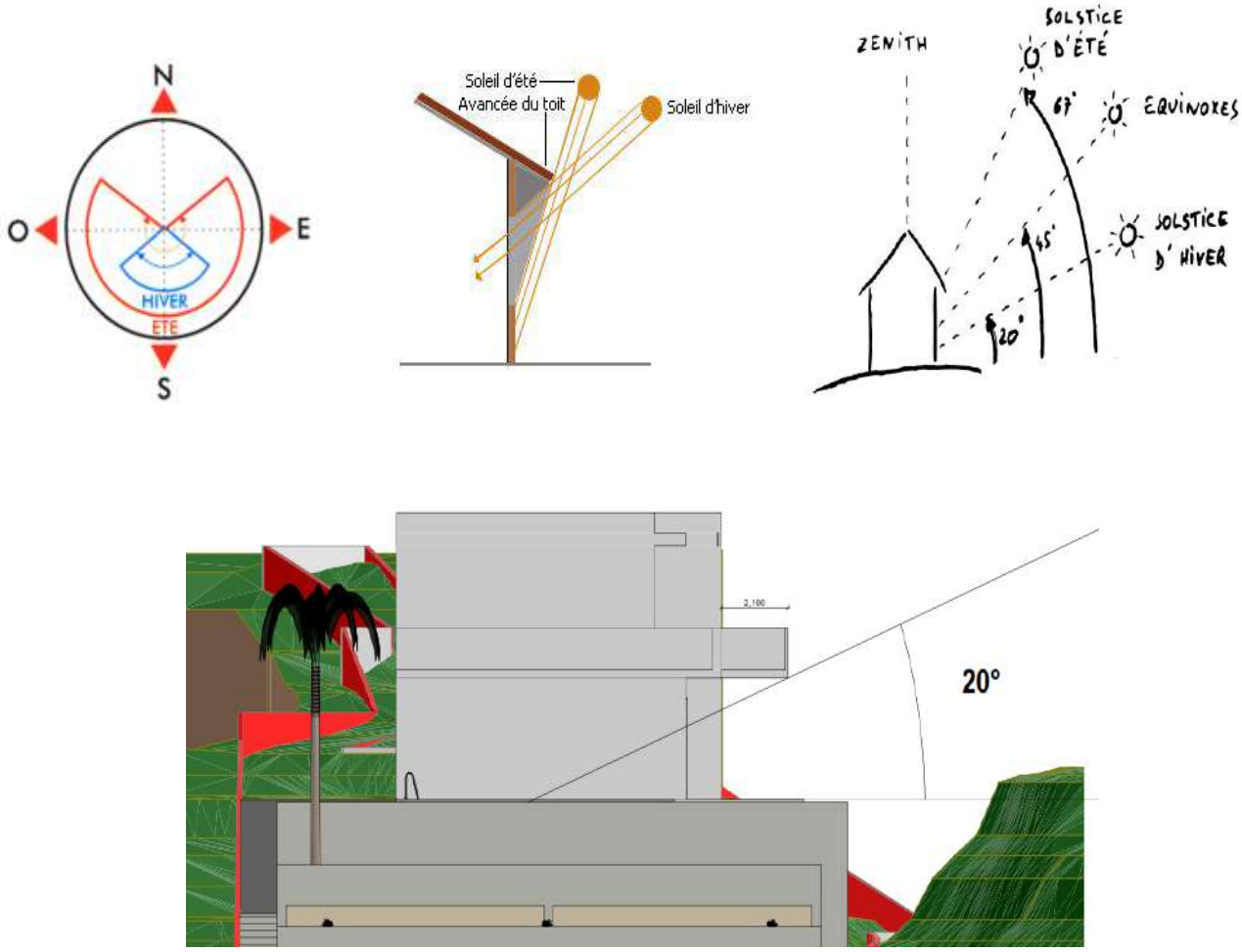



Figure II. 19 -Schéma de la frappe des rayons du soleil, en été et en hiver et l'orientation du bâti, (Bureau d'étude Ali SALAH, Alger, 2020).

**II. 3. 1. 1. 5 Organisation de l'espace intérieur** (voir figure II-20)

La façade Sud étant la plus agréable du point de vue thermique (chaude en hiver, fraîche en été) et la plus éclairée, il est préférable d'y placer les pièces à vivre, telles que le salon, les chambres principales afin de profiter au mieux de tous les avantages de cette orientation.

Les chambres principales peuvent également être orientées au Sud-Est et à l'Est, afin de profiter du lever du soleil tout en restant fraîches en fin de journée.

L'orientation de la cuisine dépend de notre mode de vie. Si elle est pour nous une pièce de séjour dans laquelle nous prenons la plupart de nos repas, une orientation Sud est conseillée. Une orientation Sud-Est nous permettra de prendre nos petits déjeuners en profitant du soleil matinal. En revanche, si nous ne supportons pas les grosses chaleurs d'été, il est préférable de placer la cuisine au Nord : en effet, c'est une pièce qui dégage beaucoup de chaleur à cause des appareils de cuisson.

Les salles de bain sont des pièces ne nécessitant que peu d'ensoleillement, voire pas d'ouvertures. Il est donc conseillé de les placer au Nord.

Les pièces utilitaires, où il n'est pas nécessaire d'avoir une température confortable (entrée, garage, atelier, débarras...), seront de préférence disposées côté Nord. Ces espaces peu ou non chauffés, appelés espaces tampons, se comporteront comme des isolants thermiques et diminueront les pertes de chaleur et donc la dépense énergétique durant l'hiver.

Durant l'été, ils se comporteront aussi comme des isolants thermiques, puisqu'ils atténuent les rayons solaires le jour et favorisent l'évacuation de chaleur le soir.

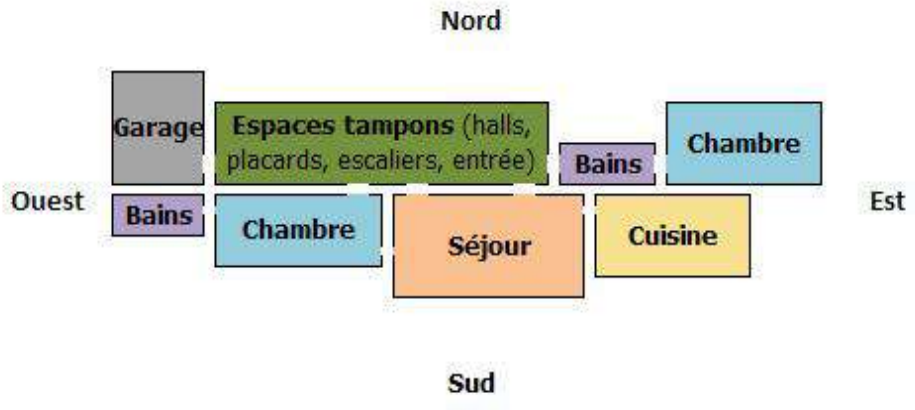



Figure II. 20- Orientation des pièces de la maison. (Foura Samir, 2007).

### II. 3. 1. 1. 6 Les équipements de confort adopté pour les maisons écologiques

Les équipements écologiques, sont tous ces dispositifs qui utilisent des énergies renouvelables, ils doivent permettre de réduire la consommation d'énergie, de produire de l'énergie propre, d'assurer le bien-être et de préserver la santé des résidents.

Les équipements adoptés dans notre modèle se déclinent comme suit:

- ✓ Panneaux aérovoltaïques : 4 fois de plus efficaces que les panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité. Ces panneaux offrent une possibilité de récupérer et d'absorber la chaleur produite, pour l'utiliser pour chauffage (air chaud, eau chaude).
- ✓ La récupération de l'air chaud est aspirée par une C.T.A (centrale de traitement de l'air) fine, placée et bien encastrée dans la toiture de la maison.
- ✓ La production de l'eau chaude est assurée par absorption de chaleur produite par ces panneaux grâce à un caloporteur d'une pompe à chaleur liée à ces panneaux.
- ✓ Ou utilisation d'une chaudière en cas d'insuffisances en eau chaude sanitaire et en chauffage.

Ces équipements sont liés et contrôlés par un système automatisé. Les anomalies sont détectées par des capteurs de régulation (thermique, pression, rayonnement solaire, etc...). Le principe de fonctionnement du système automatisé est schématisé comme suit : quand il y a détection d'une insuffisance d'énergie ou parfois des changements de météo qui influent sur la production d'énergie (électrique, thermique) et sur le confort thermique (chauffage et climatisation) des occupants, le rôle de ce système est d'intervenir et de renverser ou de changer automatiquement le mode de consommation en cours par un mode de consommation d'énergie adéquat. Ces équipements offrent un grand avantage en matière d'économie d'énergie et de préservation de l'environnement (utilisation d'énergie propre).

Les autres équipements écologiques installés et utilisés sont (voir figure II-21) :

- ✓ Une cuve dotée d'un trop plein installée dans le jardin pour récupérer l'eau de la pluie.
- ✓ Un système de puits canadien pour rafraîchir et chauffer l'air à l'intérieur de l'enveloppe, durant les saisons estivale et hivernale.
- ✓ Une cheminée pour la ventilation naturelle et l'évacuation des odeurs et de l'air pollué dans la maison.

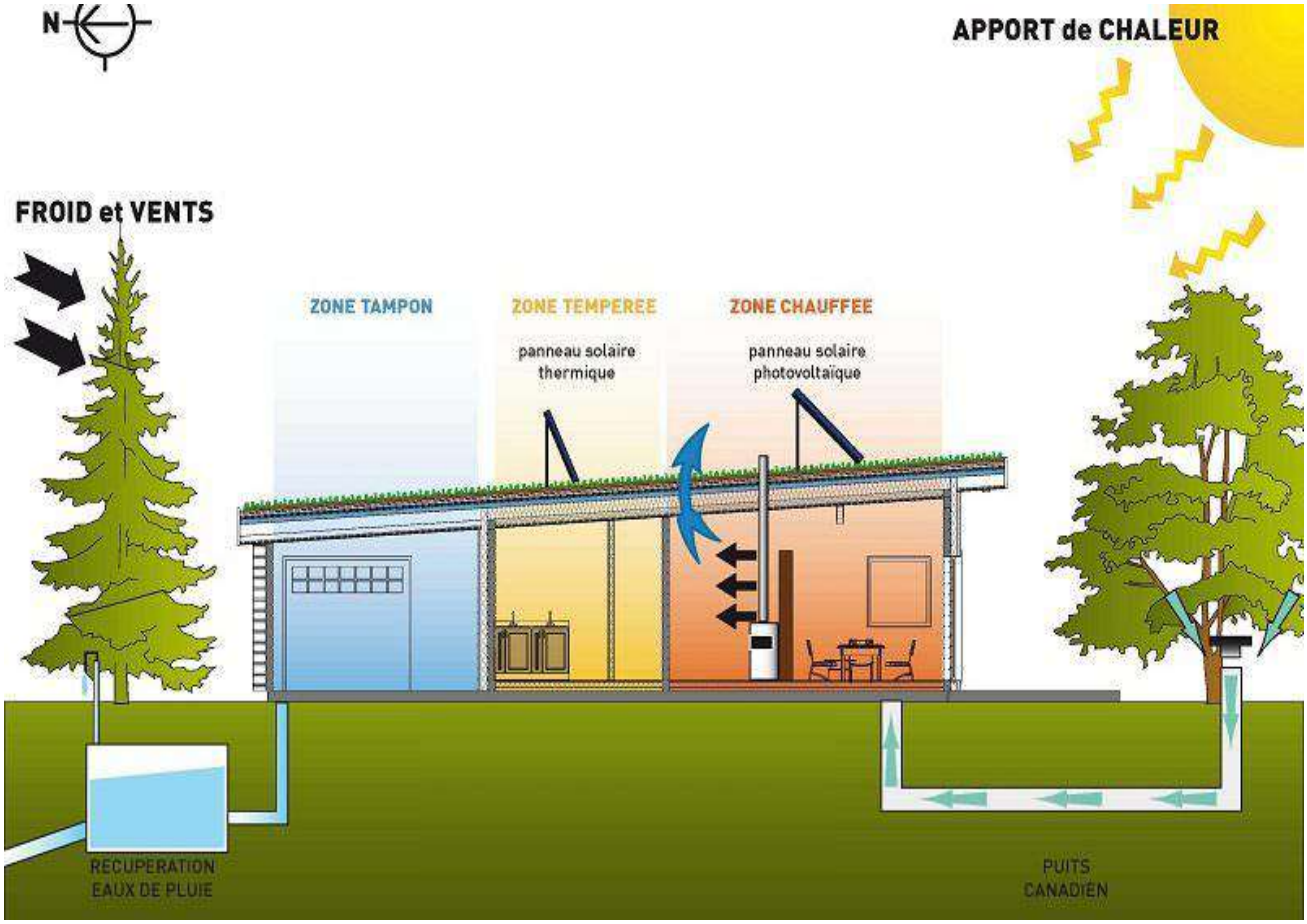



**Figure II. 21 - Les équipements de confort adopté pour les maisons écologiques, (**Site Web : Equipements écologique, http://isabelle.zanchetta.free.fr/ecoconfort/chapitres/chap1.htm).

#### II. 3. 1. 1. 6. 1 Récupération de l'eau de pluie

Il s'agit d'installer une cuve dans le jardin, équipée d'un trop-plein. Celle-ci sera remplie par les eaux pluviales, préalablement filtrées. Une pompe permettra par la suite de renvoyer l'eau dans la maison. Cette eau est saine et moins calcaire que les eaux normales, ce qui évite l'usage d'adoucissants, néfastes pour l'environnement et pour les lessives. Cette installation, en apparence onéreuse, devient rapidement rentable.

#### II. 3. 1. 1. 6. 2 Production d'électricité, de chauffage et de climatisation (voir figure II-22)

Le chauffage et l'électricité sont assurés par la récupération des rayonnements solaires et la chaleur produite par des panneaux aérovoltaïque. L'utilisation de la C.T.A fine posée et bien encastrée dans la toiture de la maison permet d'aspirer l'air chaud produit par ces panneaux, alors que l'échange thermique est assuré par la pompe à chaleur air-eau qui est installée en parallèle avec ces panneaux. Un capteur d'ensoleillement est installé pour intervenir automatiquement sur l'angle d'exposition de ces panneaux afin d'améliorer leurs rendements et leurs efficacités dans la production de l'énergie.

La chaudière est installée pour la production de l'eau chaude et l'utilisation du chauffage ainsi que les besoins sanitaires. Pour se faire, la chaudière à micro-cogénération ou chaudière électrogène est préférée car elles produisent à la fois de l'électricité et de l'eau chaude ; le principe de la cogénération est en fait la production simultanée de l'électricité et de la chaleur et ce, à partir d'une énergie unique.

Il existe une autre méthode permettant de garder une température confortable en été comme en hiver, il s'agit du puits canadien, ou puits provençal. Cela consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur d'un ou deux mètres. Grâce à l'inertie terrestre, la terre est plus chaude que la température ambiante en hiver et à l'inverse plus fraîche en été ; ce système permet, soit d'augmenter les températures de 5 à 8 degrés, soit de les descendre de la même intensité. C'est un système écologique et économique, servant donc de chauffage en hiver et de climatisation non polluante en été.



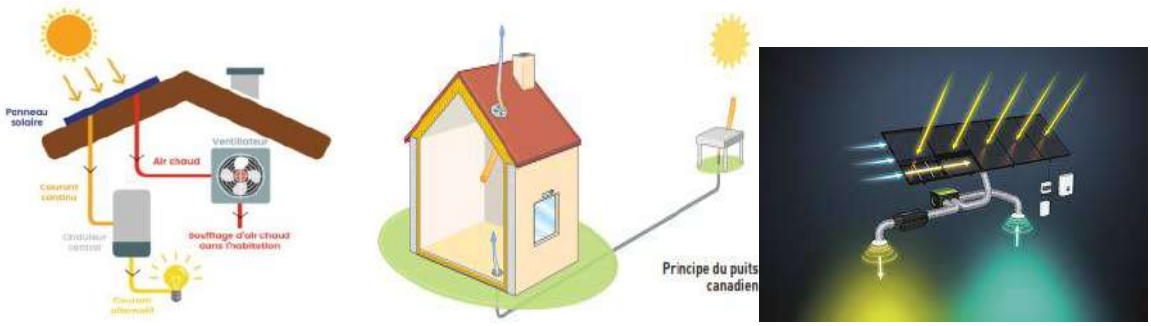




Figure II. 22 - Production d'électricité et l'air chaud par les panneaux aérovoltaïque et le principe du puits canadien **(Guide la thermique du bâtiment,2007, Site Web : Chaudière à micro cogénération** *https://www.quelleenergie.fr/chaudiere-cogeneration*, **Equipements électrique Panneaux aérovoltaïque, hybride solaire** *https://www.insunwetrust.solar/blog/techno/aerovoltaique-hybride-solaire/*).

### II. 3. 1. 1. 6. 3 - La ventilation

Dans une maison écologique, l'air ambiant doit être régulièrement renouvelé pour préserver la santé de ses résidents et éviter les problèmes liés à l'humidité (condensation et moisissure, notamment). S'il est possible de mettre en place une ventilation naturelle par un cheminée avec le principe de tirage d'air, par le principe du puits canadien, il est souvent recommandé et plus efficace d'installer une ventilation mécanique.

### II. 3. 1. 1. 6. 4 Le reste des équipements

Pour aménager sa maison écologique, il est important d'utiliser des fournitures saines. Pour cela, chaque élément électroménager doit être rigoureusement sélectionné pour ses compétences énergétiques. En ce sens, tous les produits classés A+ et supérieurs sont à préférer. De plus, ils apportent un certain confort sonore et leur durée de vie est normalement plus longue.

### II. 4 Modèle de FANGER

On prendra l'indice de FANGER comme modèle de référence car c'est le plus abouti et il est défini par rapport au confort physiologique. Afin de calculer les indices $P_{MV}$ et $P_{PD}$, nous avons développé un programme sous Excel pour faciliter les calculs et traiter les résultats de la simulation.

Dans les années soixante-dix, FANGER a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique. Cette méthode est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique (FANGER PO, 1970). Elle a servi pour développer la norme française et internationale ISO 7730. Avec le maintien de l'équilibre du bilan thermique du corps humain (condition nécessaire mais non suffisante pour le confort thermique), FANGER considère, pour le confort thermique, deux conditions supplémentaires : la limitation du débit sudoral et la température cutanée dans les limites du confort (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

La méthode de FANGER consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement (FANGER P.O, 1973). Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu, supposé être aux valeurs de confort du débit sudoral et de température cutanée, il a établi un indice, le « $P_{MV}$ », qui prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes sur une échelle à 7 points de sensation thermique de l'ASHRAE (ASHRAE handbook, 2005) (voir tableau II-6).

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

| VALEURS DE L'INDICE PMV | +3 | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | -3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SENSATION THERMIQUE | Chaud | Tiède | Légèrement tiède | Neutre | Légèrement Frais | Frais | Froid |

Tableau II. 6 - Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

La sensation thermique n'étant pas suffisante pour exprimer le confort, FANGER a proposé un autre indice qui complète le $P_{MV}$. ; le pourcentage prévisible d'insatisfaits, appelé $P_{PD}$ (Predicted Pourcentage of Dissatisfied) qui exprime la partie des sujets insatisfaits dans une condition donnée (Dr R.Cantin, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino, 2005)

Le $P_{MV}$ peut être calculé à partir des six paramètres de base du confort thermique (les quatre grandeurs physiques de l'ambiance thermique, avec l'activité et la vêture des sujets). Comme le $P_{MV}$ a été déterminé dans des conditions stationnaires (chambres climatiques), son application reste limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas, ou peu, dans le temps. Si une ou plusieurs variables fluctuent faiblement, le $P_{MV}$ peut être utilisé à condition de considérer leurs moyennes pondérées en fonction du temps pendant la période de 1 h précédente.

Pour déterminer l'état thermique du corps humain et la zone de confort, on a utilisé la deuxième relation du model de FANGER. La relation a été déterminée statistiquement à partir des études expérimentales sur près de 1300 sujets dans des chambres climatiques.

À cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales". Le $P_{PD}$ **(**pourcentage prévisible d'insatisfaits) est exprimé sous forme de pourcentage des sujets «insatisfaits» d'une ambiance thermique déterminée.

Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum, qui correspond aux conditions optimales de neutralité thermique du corps humain (AFNOR. NF EN ISO 7730, 1995). Les personnes insatisfaites sont considérées celles dont le vote de sensation est extérieur à l'intervalle [-1,1]. La relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude et froide, comme le montre la figure II. 23 ci-dessous:

La norme ISO 7730 (AFNOR. NF EN ISO 7730, 1995), stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique, il faut que :

$$-0{,}5 < \boldsymbol{PMV} < 0{,}5 \quad soit \quad \boldsymbol{PPD} < 10\ \%$$

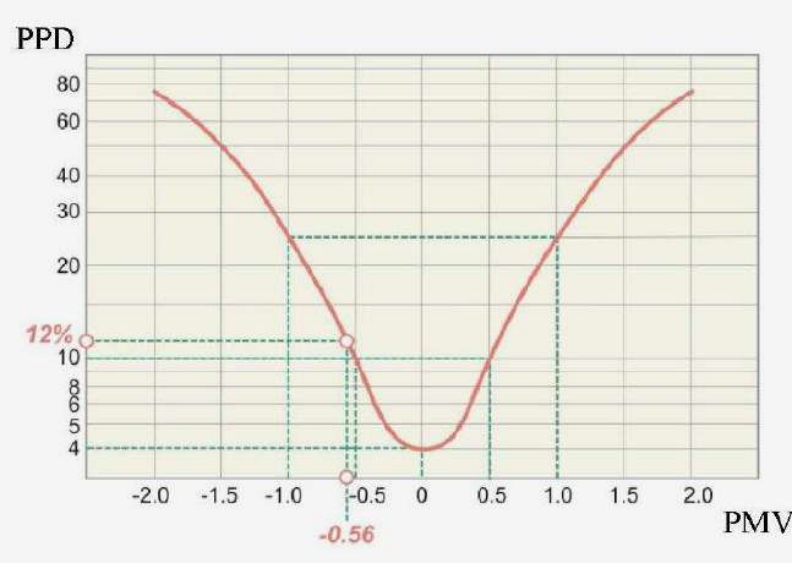



Figure II. 23 - Correspondances entre PMV et PPD, (CHERGUI Mohamed Amine, 2012).

$$PMV = [0{,}303 \,.\, \exp(-0{,}036 \,.\, M) + 0{,}028] \,.\, L \quad \text{(II.1)}$$

$$L = M - W - E_{sk} - E_{req} - E_{res} - C_{res} - (C + R) \quad \text{(II.2)}$$

$$PPD = 1 - 0{,}95 \exp(-0{,}003353 \,.\, PMV^4 - 0{,}2179 \,.\, PMV^2) \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

L l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue [W/m²],

$P_{MV}$ vote moyen prévisible à l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE [1],

$P_{PD}$ Pourcentage prévu des insatisfaits [%]

Cet indice n'est utilisable que sous certaines conditions de métabolisme, d'isolement vestimentaire, de température d'air, de rayonnement et de vitesse d'air :

- M : [46-232] W/m²
- $I_{cl}$ : [0-0,31] m². °C/W
- $T_a$ : [10-30] °C
- $T_r$ : [10-40] °C
- $V_a$ : [0-1] m/s

Ce modèle est applicable seulement pour des situations statiques.

$$L = M - W - E_{sk} - E_{req} - E_{res} - C_{res} - (C + R) \quad \text{(II.4)}$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation, par diffusion à travers la peau [W/m²]:

$$E_{sk} = 3{,}05 \,.\, 10^{3-}[5{,}733 - 6{,}99(M - W) - Pa] \quad \text{(II.5)}$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation respiratoire [W/m²]:

$$E_{res} = 1{,}7.\,10^{10-}\ .M\,(5867 - Pa) \qquad \text{(II.6)}$$

Flux de chaleur échangé par convection respiratoire [W/m²]:

$$C_{res} = 0{,}0014\ .M(34 - T_a) \qquad \text{(II.7)}$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation due à la sudation régulatrice [W/m²]:

$$E_{req} = 0{,}42 - (M - W - 58{,}15) \qquad \text{(II.8)}$$

Flux de chaleur échangé par rayonnement [W/m²] :

$$R = (3{,}96 \times 10^{-8}\ .F_{cl}\ .[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \qquad \text{(II.9)}$$

Flux de chaleur échangé par convection [W/m²]:

$$C = F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \qquad \text{(II.10)}$$

$$C + R = I \qquad \text{(II.11)}$$

La température moyenne superficielle du vêtement [°C] :

$$T_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028\ .M - 0{,}155I_{cl}.[3{,}96 \times 10^{-8}\ .F_{cl}((T_{cl} + 273)^4) + F_{cl}h_c(T_{cl} - 273)] \qquad \text{(II.12)}$$

Le facteur d'habillement : Rapport de la surface du corps habillé à la surface du corps nu :

$$F_{cl} = \begin{cases} 1{,}00 + 0{,}2\ .I_{cl} & Si \quad I_{cl} \le 0{,}5\ clo \\ 1{,}05 + 0{,}1\ .I_{cl} & Si \quad 2{,}38\ (T_{cl} - T_a)^{0{,}25}\ I_{cl} > 0{,}5\ clo \end{cases} \qquad \text{(II.13)}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m². °C]

$$h_c = \begin{cases} 12{,}1\sqrt{V} & \text{Si} \quad 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} \leq 12{,}1\sqrt{V} \\ 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} & \text{Si} \quad 2{,}38\,(T_{cl} - T_a)^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{V} \end{cases}$$

(II.14)

La pression saturante de vapeur d'eau [kPa] :

$$P_s = \exp\left[16\,.65 - 4030\,.18 / (T_a + 235\right] \quad \text{(II.15)}$$

La pression partielle de vapeur d'eau [Pa] :

$$P_a = H_r \times P_s \times 10 \quad \text{(II.16)}$$

La température cutanée moyenne se calcul théoriquement comme suite :

$$T_{sk} = 30 + 0{,}093.T_a + 0{,}045.T_r - 0{,}571\,.V_a + 0{,}0254\,.P_{aH20} + 0{,}00128\,.M - 3{,}571\,.I_{cl} \quad \text{(II.17)}$$

# CHAPITRE N°III :

# ANALYSE PARAMÉTRIQUE

### III. 1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier et analyser différentes données liées au confort thermique. On utilise le modèle de FANGER et le logiciel « Excel » pour faciliter les calculs et traiter les résultats de la simulation. Les six (6) paramètres qui régissent et influencent le confort thermique des bâtiments sont :

- ✓ La température ambiante **($T_a$)**.
- ✓ La température radiant **($T_r$)**.
- ✓ Le métabolisme **(M)** et le travail fournier l'effort physique du résidu **(W).**
- ✓ La vitesse de l'air in situ **($V_a$)**.
- ✓ L'effet du degré hygrométrique de l'air **(**l'humidité relative de l'air ambiante) **($H_r$).**
- ✓ Résistance thermique de la vêture **($I_{cl}$)**.

On va donc considérer chaque paramètre étudié comme variable en lui attribuant 5 valeurs distinctes, le reste des paramètres seront fixés. Ensuite, on passe à la simulation par le traitement des calculs par le logiciel dédié « Excel » et voir l'influence du paramètre étudié sur le modèle de confort retenus.

L'analyse se fera au niveau théorique, c'est-à-dire à partir des équations mathématiques définissant ce modèle. On prendra l'indice de FANGER comme modèle de référence car c'est le plus abouti et qu'il est défini par rapport au confort physiologique. Afin de calculer les indices $P_{MV}$ et $P_{PD}$, nous avons utilisé le logiciel « Excel » pour le traitement des résultats de la simulation.

### III. 2 Analyse et étude paramétrique du confort thermique

#### III. 2. 1 Application de modèle FANGER (le cas d'une personne à la maison en période d'été)

Afin d'appliquer le modèle de FANGER et faciliter les calculs on utilise le programme Excel pour la programmation des équations (II-1), (II-2), (II-3), (II-4), (II-5), (II-6), (II-7), (II-8), (II-9), (II-10), (II-11), (II-12), (II-13), (II-14), (II-15), (II-16), (II-17).

#### III. 2. 1. 1- Les paramètres

- Métabolisme, M= 69,78 W/m² avec (1 $m_{et}$ = 58,15W/m²)

| Activité | W/m² | $m_{et}$ |
|---|---|---|
| Activité légère, assis (salon) | 69,78 | 1,2 |

Tableau III. 1 – Métabolisme d'une personne a une activité légère, assise, (CHERGUI Mohamed Amine 2012)

- Résistance thermique de la vêture Icl= 0,5 clo avec (1 clo = 0,155 m² c˚/W)

| Tenue vestimentaire | Habillement $I_{cl}$ | m²c˚/w |
|---|---|---|
| Tenue d'été légère (pantalon léger, chemise à col ouvert et à manches courtes, chaussettes légères et chaussures). | 0,5 $C_{lo}$ | 0,0775 |

Tableau III. 2 – Tenu vestimentaire légère au mois d'été, (CHERGUI Mohamed Amine 2012)

- Température de l'air ambiant $T_a$ =24 (°C).
- Température moyenne radiante: $T_r$ =20 (C°).
- Vitesse de l'air $V_a$=0,08 m /s.
- Humidité relative $R_H$=60%.

| es données d'entrée | | | calcules intermédiaires | | | | | | Les données sortes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M(met)= | 1,2 | | T skin= | 33,32 | c˚ | | | | Convection = | 15,6724 | w/m² |
| W(met)= | 0 | | | | | | | | Radiation = | 56,7195 | w/m² |
| Icl(clo)= | 0,5 | | hc conv naturel= | 3,400 | w/m²c˚ | | | | Evaporatoire = | -7,5229 | w/m² |
| Ta(c˚) | 28 | | | | | 3,4224 | w/m²c˚ | | Convectifes res = | 0,5862 | w/m² |
| Tr(c˚) | 20 | | hc conv= | 3,422 | w/m²c˚ | | | | Echange res = | 4,6056 | w/m² |
| HR%= | 60 | | | | | | | | Ereq = | 4,8846 | w/m² |
| Va(m/s)= | 0,08 | | | | | | | | Bilan global = | -5,1653 | w/m² |
| | | | | | Tcl= | 32,16 | c˚ | | [(M-W)-B] = | 74,9453 | w/m² |
| M(w/m²)= | 69,78 | | | | | | | | | | |
| W(w/m²)= | 0 | | F cl(Icl<=0.5)= | 1,1007 | | | | | PMV= | -0,2716 | |
| Icl(m²c˚/w)= | 0,0775 | | | | Fcl min= | 1,09998 | m²c˚/w | | PPD= | 6,5314 | % |
| µ(%)= | 20 | | F cl(Icl>0.5)= | 1,1000 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | W(w/m²) cas effort physique= | | | 13,956 | w/m² | | | | |
| | | | Ps (pascal)= | 3,3075 | | | | | | | |
| | | | Pa (pascal)= | 1984,510 | | | | | | | |

Tableau III. 3 - Modèle pour le calcul des indices de confort thermique PMV et PPD en utilisant le logiciel Excel (la méthode de FANGER :ISO 7730).

| | w/m² | Pourcentage |
|---|---|---|
| **Equilibre [(M-W)-L]** | 74,94 | / |
| **Bilan globale** | -5,16 | / |
| **Radiation** | 56,71 | 63 % |
| **Convection** | 15,67 | 17% |
| **Convectifs res** | 0,58 | 1 % |
| **Evaporatoire** | -7,52 | -8 % |
| **Echange res** | 4,60 | 5 % |
| **$E_{req}$** | 4,88 | 6% |

Tableau III. 4 - Les échanges thermiques, bilan globale et équilibre [(M-W)-L].

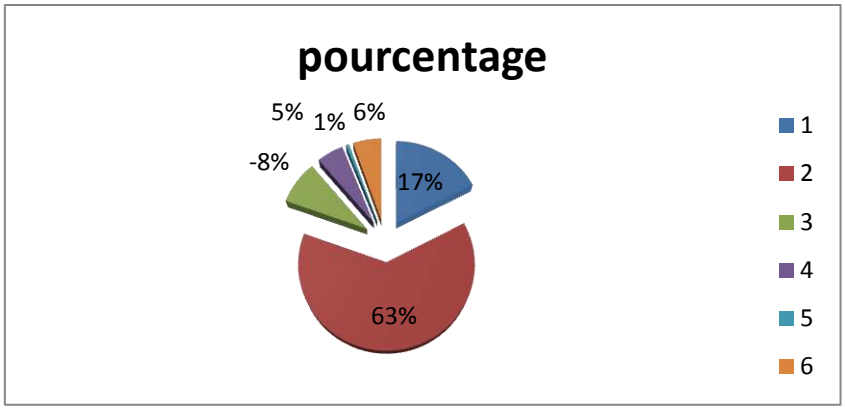



Figure III. 1 - Pourcentage des échanges thermiques

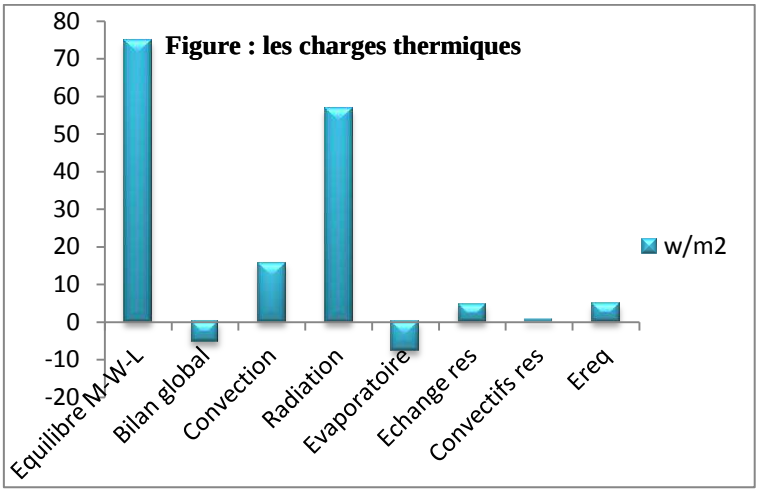



Figure III. 2 Les charges thermiques.

La figure III. 3 représente la position du point (**$P_{MV}$= -0,27, $P_{PD}$= 6,53**) :

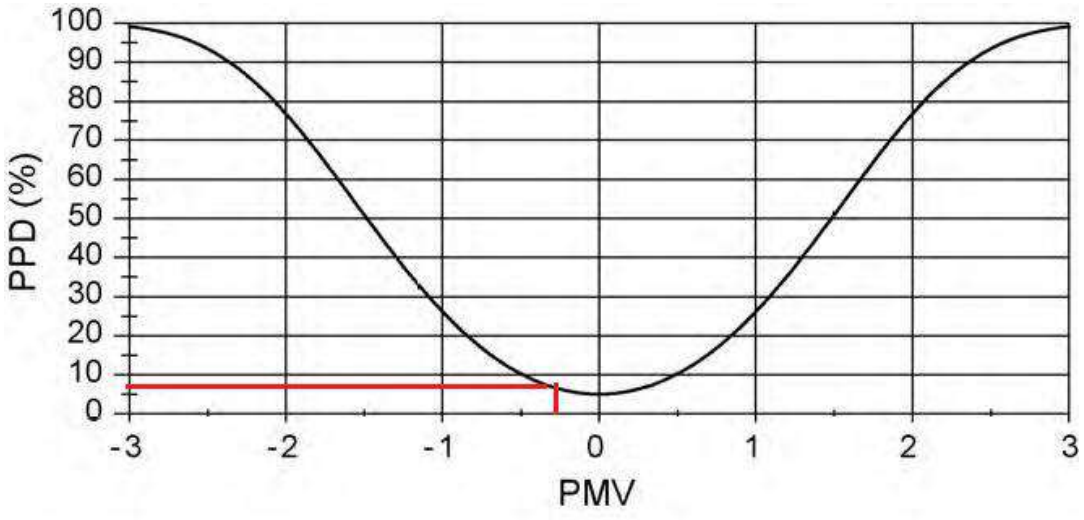



Figure III. 3 - Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) en fonction du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$)

### III. 2. 2 - Analyse des paramètres du confort thermique

On va considérer chaque paramètre étudié comme variable en lui attribuant 5 valeurs distinctes, le reste des paramètres seront fixés. Ensuite, on passe à la simulation par le traitement des calculs par le logiciel dédié (Excel) et voir l'influence du paramètre étudié sur le modèle de confort retenus.

Afin de calculer les indice $P_{MV}$ et $P_{PD}$ on utilise le programme Excel en programmant les équations : (II-1), (II-2), (II-3), (II-4), (II-5), (II-6), (II-7), (II-8), (II-9), (II-10), (II-11), (II-12), (II-13), (II-14), (II-15), (II-16), (II-17).

#### III. 2. 2. 1 - Effet de la température ambiante ($T_a$)

On utilise les équations suivantes : (II-1), (II-2), (II-3), (II-4), (II-5), (II-6), (II-7), (II-8), (II-9), (II-10), (II-11), (II-12), (II-13), (II-14), (II-15), (II-16), (II-17).

**i/ Calcul de $P_{MV}$/ $P_{PD}$ :**

**Exemple de calcul :**

On prend les paramètres suivants pour analyser l'effet de la température ambiante $T_a$ sur le confort thermique de la maison :

- **1$^{er}$ cas d'étude** : Pour $T_a$ = +10 c˚.

Donc on prend les paramètres suivants :

M=69,78 w/m², W= 0 w/m², Va= 0,08 m/s, HR= 60%, Icl= 0,0775 m²c˚/w, Tr= 20 c˚.

**A/ - Calcul du bilan global :**

Pour le calcul du bilan global, on va utiliser la formule (II. 4)

**A1/ Calcul du Flux de chaleur latente échangé par évaporation $E_{sk}$, par diffusion à travers la peau [W/m²]:**

Pour le calcul du flux de chaleur latente échangé par évaporation, par diffusion à travers la peau, on utilise la formule (II.5)

Tout d'abord on va calculer la pression saturante et la pression partielle de la vapeur d'eau **Ps** [kPa] en utilisant la formule (II.15).

- Donc **:** Ps = exp [16.65-4030.18/(10+235)]

**Ps= 3,611 [KPa]. (III. 1)**

La pression partielle de vapeur d'eau [Pa] est calculée par la formule II.16)

- **Donc :** Pa = 60 x 10 x 3,611x$10^3$

**Pa= 2166,81 [Pa]** **(III. 2)**

❖ **Appliquer (III. 1) et (III. 2) sur (II. 5)**

- On a **:** **$E_{sk}$ = -8,07 [w/m²].**

**A2/ Calcul du flux de chaleur latente échangé par évaporation respiratoire $E_{res}$ [W/m²] en utilisant l'équation (II. 6)**

- **Donc** : **$E_{res}$ = 4,38 [w/m²].**

**A3/ Calcul du flux de chaleur échangé par convection respiratoire $C_{res}$ [W/m²], en utilisant la formule (II. 7)**

**Donc :** **$C_{res}$ = 2,34 [w/m²].**

**A4/ Calcul de la température ($T_{sk}$) cutanée et de la température moyenne superficielle du vêtement ($T_{cl}$) [C°] en appliquant l'équation (II.17).**

**Donc :** **$T_{sk}$ = 31,65 [C°].**

**A4-1/Le calcul de la température moyenne superficielle du vêtement ($T_{cl}$) en utilisant la formule (II.12)**

**Donc :** **$T_{cl}$ = 23,90 [C°].**

**A5/ Calcul du flux de chaleur latente échangé par évaporation due à la sudation régulatrice $E_{rsw,\ req}$ est calculé d'après Rohles et Nevins (ASHRAE, 1997) [W/m²] par la formule (II. 8)**

**Donc:** **$E_{rsw,\ req}$ = 4.88 [w/m²].**

**A6/ Le calcul du facteur d'habillement ($F_{cl}$) et coefficient de convection ($h_c$) sont déterminées à partir des formules (II.13) et (II.14), respectivement :**

- **Le facteur d'habillement est égale :** **$F_{cl}$ = 1,099 [m²c°/w] .**

- **Le coefficient de convection égal :** **$h_c$ = 4,59 [w/m²c°] .**

**A7/ Calcul du flux de chaleur échangé par convection C [W/m²], par la formule (II. 10):**

**Donc :** **C = 70,23 [w/m²].**

**A8/ Calcul du flux de chaleur échangé par rayonnement [W/m²], déterminé à partir de l'équation (II.9) :**

**Donc :** **R = 17,41 [w/m²].**

Alors, le bilan thermique global est déduit par la formule (II.4) et est égal :

**Donc :** **L= -21,40 [w/m²].**

**A9/ Calcul du $P_{MV}$ et $P_{PD}$ à partir des formules (II.1) et (II.3)**

- **Donc :** **$P_{MV}$ = - 1,12**
- **Donc :** **$P_{PD}$ = 31,68 [%]**

| Les cas | Ta c° | M w/m² | W w/m² | Va m/s | HR % | Icl m²c°/w | Tr c° | PaH2O pa | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2166,81 | -1,12 | 31,68 |
| 2 | 15 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2111,87 | -0,79 | 18,29 |
| 3 | 20 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2060,39 | -0,52 | 10,79 |
| 4 | 25 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2012,09 | -0,33 | 7,34 |
| 5 | 30 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 1966,67 | -0,29 | 6,76 |

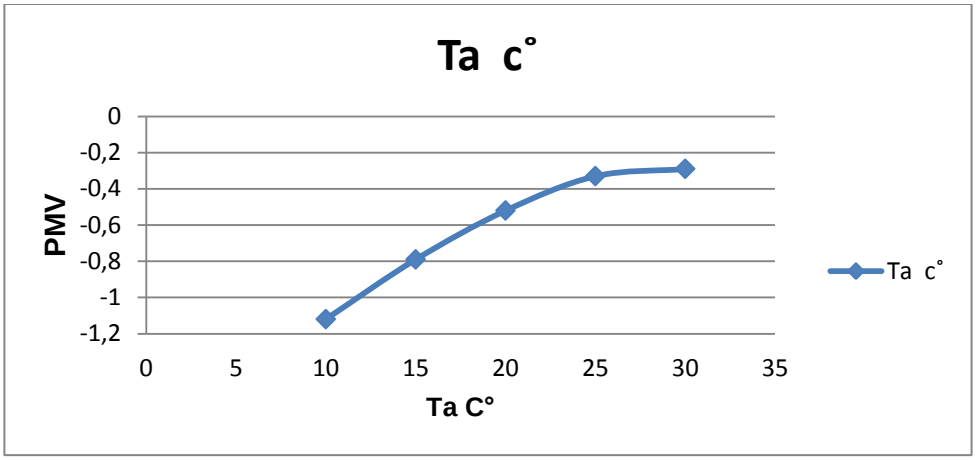
Tableau III. 5 - tableau récapitulatif du calcul de modèle de FANGER, analyse de l'effet de (Ta) sur le confort thermique.

La température de l'air est un paramètre très important parce qu'elle participe activement et de façon permanente aux déperditions caloriques du corps humain du fait de sa part active dans les échanges convectifs mais, seule, elle ne reflète pas parfaitement la sensation de confort. Son impact est d'autant plus grand que les vitesses de l'air et des courants sont également influents dans cette modalité d'échange. Les figures (III**.** 4) (a) et (III. 4) (b) montrent l'effet de la température ambiante sur les indices de confort de FANGER ($P_{MV}$ et $P_{PD}$).

Dans ces conditions, la sensation de confort est obtenue à partir de $T_a$= 28°C ce qui est le cas d'un individu assis au repos, en tenue de sport par exemple.

**ii/ Présentation graphique**

**(a)**




**(b)**

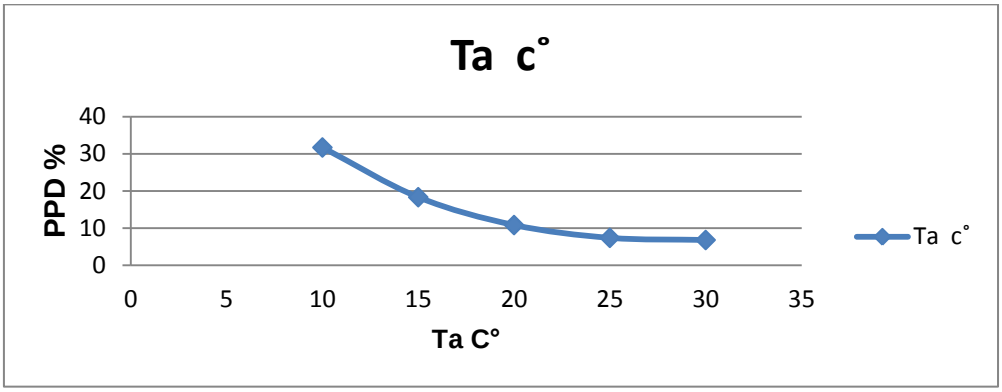



Figure III. 4 : Variation de PMV et PPD en fonction de la Température ambiante (Ta)

**(Icl= 0.0775 m²c°/w, M= 69,78 w/m², W= 0, Va= 0.08m/s, HR= 60%, Tr= 20 C ).**

### III. 2. 2. 2 - Effet de la température radiante ($T_r$)

### i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)

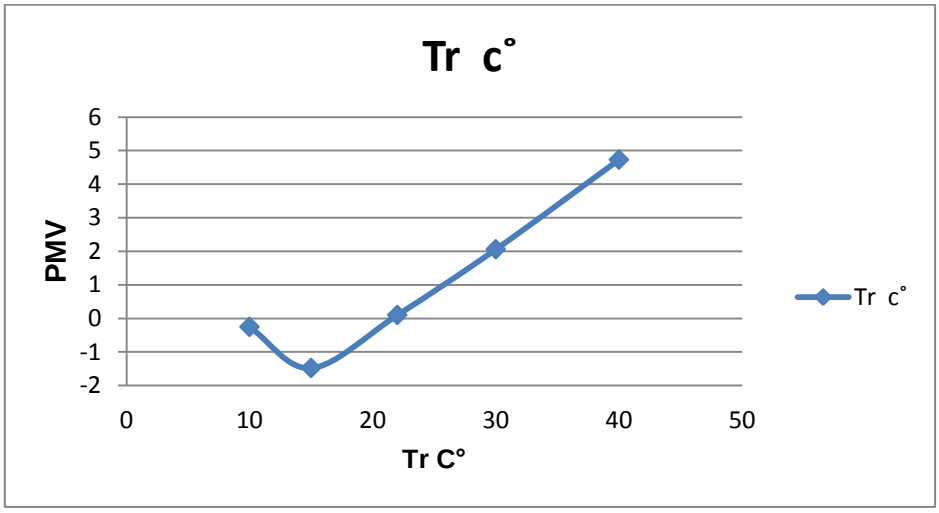
| Les cas | Tr c° | M w/m² | W w/m² | Va m/s | HR % | Icl m²c°/w | Ta c° | PaH2O pa | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | -0,271 | 96,92 |
| 2 | 15 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | -1,64 | 59,02 |
| 3 | 22 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | -0,06 | 5,07 |
| 4 | 30 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 1,89 | 71,96 |
| 5 | 40 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 4,57 | 100 |

Tableau III. 6 - Tableau récapitulatif du calcul de modèle de FANGER, analyse de l'effet de ($T_r$) sur le confort thermique.

La température de rayonnement correspond à la température des surfaces avec lesquelles le corps humain échange de la chaleur. Ce paramètre à une influence considérable sur le niveau de confort thermique en particulier dans les espaces ouverts urbains. D'après la figure (III. 5) (a) et (b), la zone de confort est conçue pour une température moyenne radiante égale à (22°C). En réalité, la zone de confort optimal est principalement localisée dans l'espace où la température radiante est supérieure à la température ambiante ($T_r > T_a$) ce qui implique que l'être humain est fait pour vivre dans une ambiance radiative. Le soleil est nécessaire, ainsi que la vie à l'extérieur ce qui conduit à un attrait indéniable vers les régions ensoleillées.

**ii/ Présentation graphique**

(a)




(b)

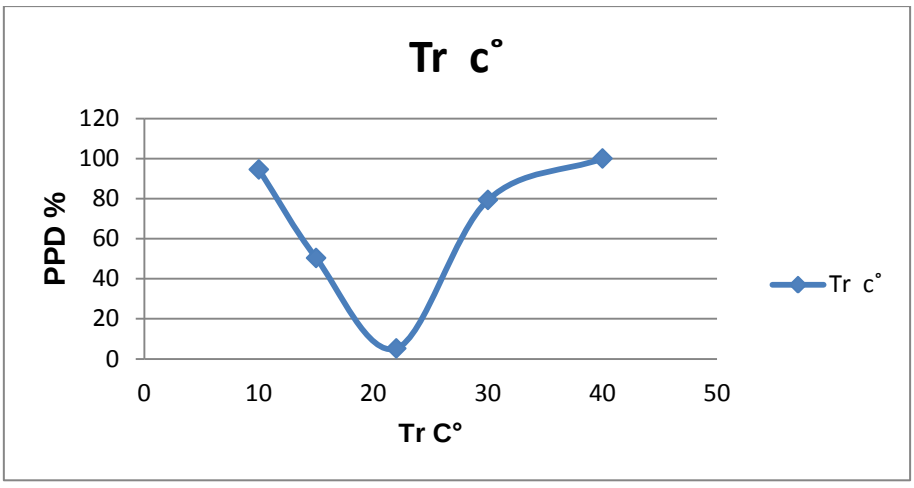



Figure III. 5 : Variation du $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de la Température radiante ($T_r$)

**($I_{cl}$ = 0.0775 m²c°/w, M= 69,78 w/m², W= 0, $V_a$= 0.08m/s, $H_R$= 60%, $T_a$= 20 C ).**

### III. 2. 2. 3 - L'effet métabolique (M)

#### i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)

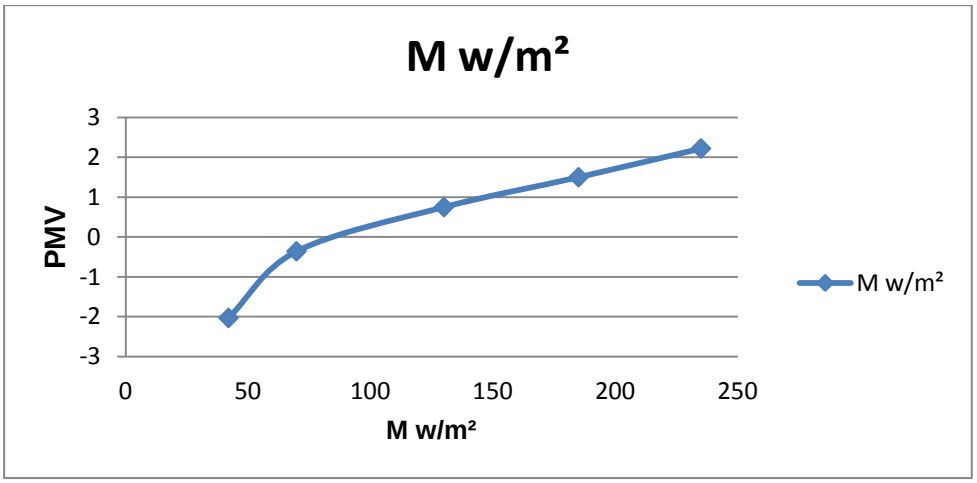
| Les cas | M w/m² | Ta c° | W w/m² | Va m/s | HR % | Icl m²c°/w | Tr c° | PaH2O pa | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 42 | 24 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | -2,03 | 78,35 |
| 2 | 69,78 | 24 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | -0,36 | 7,79 |
| 3 | 130 | 24 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 0,75 | 16,95 |
| 4 | 185 | 24 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 1,50 | 51,40 |
| 5 | 235 | 24 | 0 | 0,08 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 2,22 | 85,77 |

Tableau III. 7 - Tableau récapitulatif du calcul de modèle de FANGER, analyse de l'effet de (M) sur le confort thermique.

Le niveau d'activité influence le confort thermique individuel à travers la production de chaleur métabolique interne. Les figures (III. 6. a) et (III. 6. b) montrent l'effet du métabolisme sur les indices de confort de FANGER ($P_{MV}$ et $P_{PD}$). Comme le montre la figure (III. 6. a) une augmentation de l'activité conduit directement à une production métabolique plus importante et induit indirectement une augmentation de la vitesse relative de l'air (par déplacement). Dans ces conditions, pour assurer le confort, on doit abaisser la température ambiante ou abaisser le « $c_{lo}$ » en se découvrant, afin de permettre une évacuation du surplus d'énergie produite par l'activité métabolique.

#### ii/ Présentation graphique

(a)



(b)

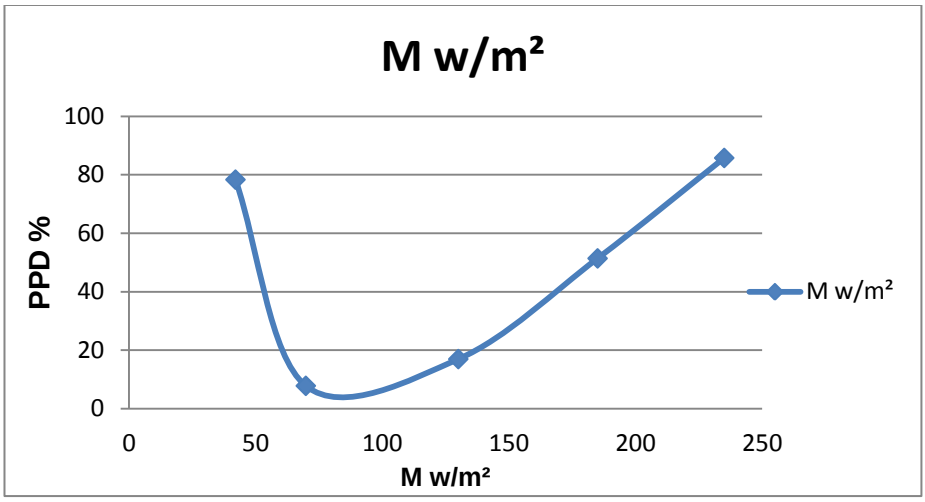



Figure III.6 : Variation de $_{PMV}$ et $P_{PD}$ en fonction du métabolique (M)

**($I_{cl}$ =0.0775 m²c°/w, $T_a$=24 C , W=0, Va=0.08m/s, HR=60%, $T_r$=20C ).**

### III. 2. 2. 4 - Effet de la vitesse de l'air ambiant ($V_a$)

### i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)

| Les cas | Va m/s | M w/m² | W w/m² | Ta c° | HR % | Icl m²c°/w | Tr c° | PaH2O pa | hc m²c°/w | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 69,78 | 0 | 24 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 3,77 | 0,36 | 7,79 |
| 2 | 0,13 | 69,78 | 0 | 24 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 4,36 | -0,58 | 12,09 |
| 3 | 0,2 | 69,78 | 0 | 24 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 5,41 | -0,96 | 24,68 |
| 4 | 0,5 | 69,78 | 0 | 24 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 8,55 | -2,11 | 81,71 |
| 5 | 1 | 69,78 | 0 | 24 | 60 | 0,0775 | 20 | 2021,51 | 12,1 | -3,41 | 99,92 |

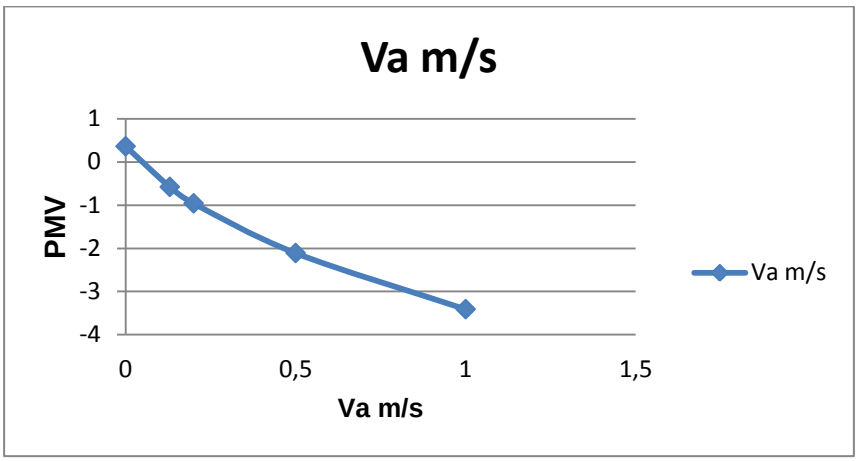
Tableau III. 8 - Tableau récapitulatif du calcul de modèle de FANGER, analyse de l'effet de (Va) sur le confort thermique.

La vitesse de l'air (plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération ; elle influe sur les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation au niveau de la surface de la peau. Comme la température de la peau est presque toujours plus haute que la température extérieure, le terme convectif est un terme négatif, correspondant à une situation de refroidissement. Ainsi, elle entraine un effet de froid. C'est pourquoi la sensation de température est d'autant plus élevée que la vitesse de l'air est lente. Inversement, quand la vitesse de l'air est plus conséquente, la température de l'air perçue est plus faible. En résumé, quand la température de l'air est élevée, le rafraichissement améliore le confort alors qu'en situation inverse à température de l'air faible, il le dégrade.

D’après la figure (III. 7. a) et (III. 7. b), la vitesse optimale de confort est autour de 0,2m/s pour $T_a$=24°C. En pratique, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne devraient pas dépasser cette valeur. En effet, l'individu commence à ressentir le mouvement de l'air à cette vitesse, et les concepteurs de systèmes de ventilation mécanique essayent donc de ne pas la dépasser.

**ii/ Présentation graphique**

(a)




(b)

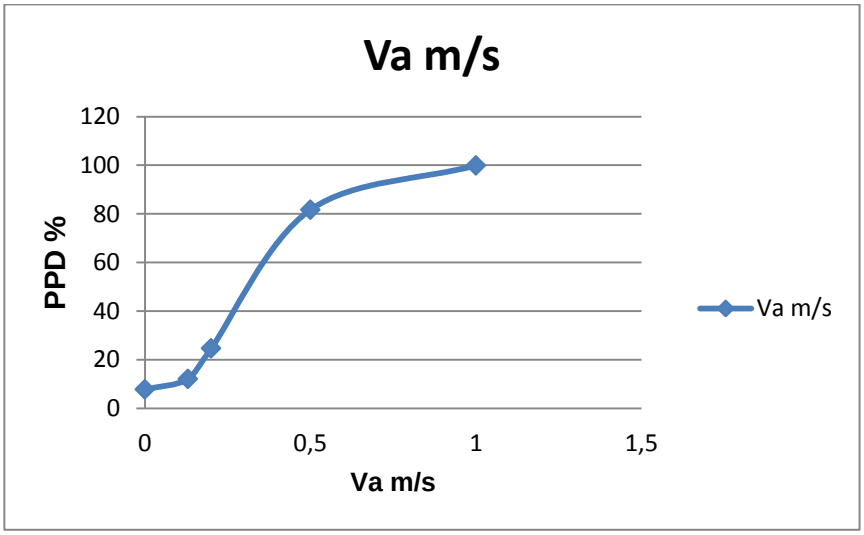



Figure III. 7 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de la vitesse de l’air ambiant ($V_a$)

**($I_{cl}$ = 0.0775 m²c°/w, C , M =69,78 w/m², W= 0, $T_a$= 24, $H_R$= 60%, $T_r$ =20C ).**

### III. 2. 2. 5 Effet de l'isolement vestimentaire ($I_{cl}$)

### i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)

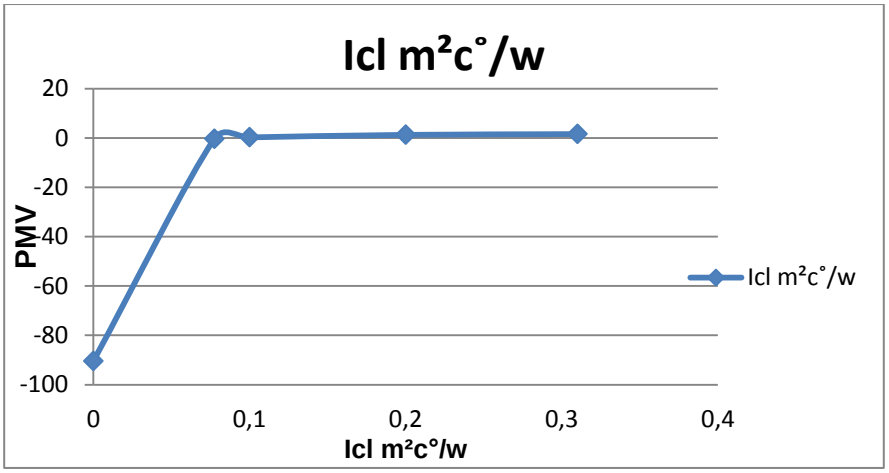
| Les cas | Icl m²c°/w | M w/m² | W w/m² | Va m/s | HR % | Ta c° | Tr c° | PaH2O pa | Fcl m²c°/w | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 24 | 20 | 2021,51 | 1 | -90,44 | 100 |
| 2 | 0,0775 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 24 | 20 | 2021,51 | 1,099 | -0,36 | 7,79 |
| 3 | 0,1 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 24 | 20 | 2021,51 | 1,11 | 0,29 | 6,82 |
| 4 | 0,2 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 24 | 20 | 2021,51 | 1,18 | 1,31 | 40,89 |
| 5 | 0,31 | 69,78 | 0 | 0,08 | 60 | 24 | 20 | 2021,51 | 1,252 | 1,62 | 57,69 |

Tableau III. 9 - Tableau récapitulatif du calcul de modèle de FANGER, analyse de l'effet de ($I_{cl}$) sur le confort thermique.

Le vêtement à une importance capitale dans la notion de confort et son action est souvent multiple. Il peut nous protéger du froid et du chaud par son pouvoir isolant et du rayonnement trop fort du soleil en pays chaud. A partir de la figure (III. 8), on constate que le vêtement influe sur différentes équations (échanges convectif et radiatif notamment). Les figures (III.8. a) et (III. 8. b) montrent l'effet de l'isolement vestimentaire sur les indices de confort de FANGER ($P_{MV}$ et $P_{PD}$). On peut à partir de ces graphes définir quel est l'habillement idéal dans ces conditions. C'est l'abscisse du point d'intersection entre la courbe considérée et la droite y = 0 du $P_{MV}$ correspondant à une valeur de $P_{PD}$ maximale. Ainsi pour $T_a$=24°C, l'habillement adapté est de 0,1. Toutefois, le fait de diminuer l'habillement pour une température élevée n'est pas suffisant pour atteindre une sensation de confort.

### ii/ Présentation graphique :

(a)




(b)

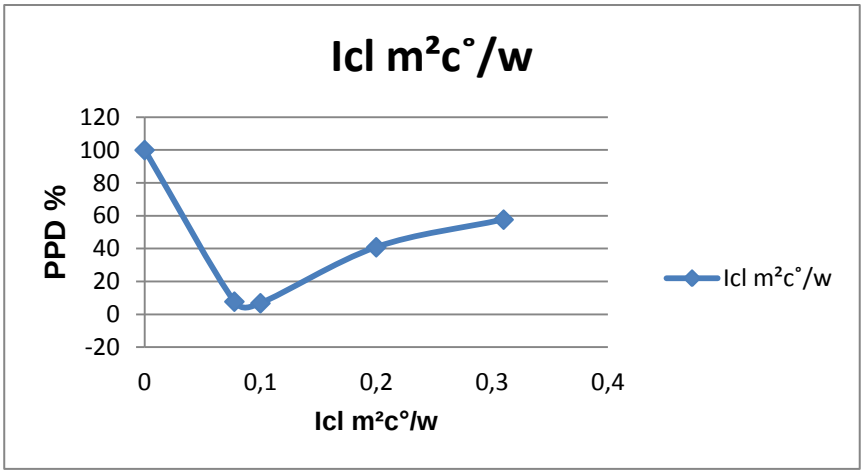



Figure III. 8 - Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction de l'isolement vestimentaire ($I_{cl}$)

**($V_a$= 0.08m/s, M= 69,78 w/m², W= 0, $T_a$= 24, $H_R$= 60%, $T_r$= 20C ).**

### III. 2. 2. 6 - L'effet du degré hygrométrique de l'air

**i/ Calcul du Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et du Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$)**

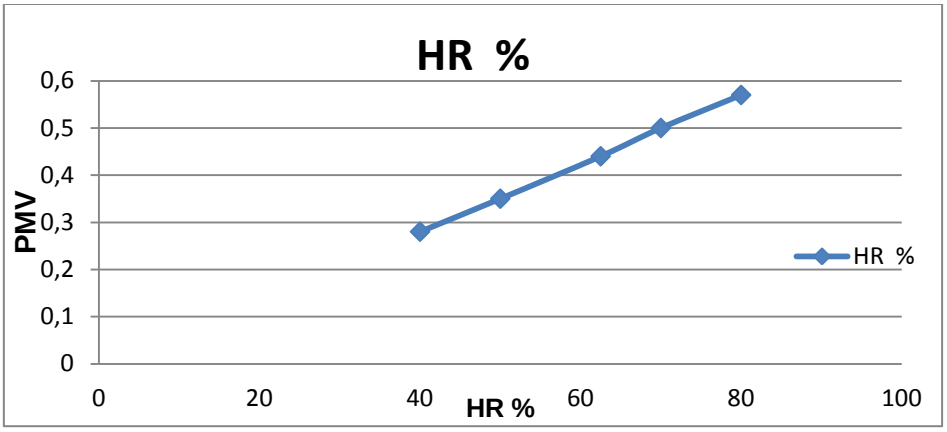
| Les cas | HR % | M w/m² | W w/m² | Va m/s | Ta c° | Icl m²c°/w | Tr c° | PaH2O pa | PMV | PPD % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 40 | 69.87 | 0 | 0,08 | 28 | 0,0775 | 23 | 1323 | 0,28 | 6,66 |
| 2 | 50 | 69.87 | 0 | 0,08 | 28 | 0,0775 | 23 | 1653,75 | 0,35 | 7,64 |
| 3 | 62,5 | 69.87 | 0 | 0,08 | 28 | 0,0775 | 23 | 2067,19 | 0,44 | 9,2 |
| 4 | 70 | 69.87 | 0 | 0,08 | 28 | 0,0775 | 23 | 2315,26 | 0,50 | 10,31 |
| 5 | 80 | 69.87 | 0 | 0,08 | 28 | 0,0775 | 23 | 2646,01 | 0,57 | 11,99 |

Tableau III. 10 - Tableau récapitulatifs du calcul de modèle de FANGER, analyse l'effet de (HR) sur le confort thermique.

L'influence de l'hygrométrie est principalement le pouvoir évaporateur de l'ambiance, caractérisé par l'écart entre la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air et la pression de vapeur saturante au niveau cutané. Un air trop humide ne permet pas une évaporation suffisante de la sueur et dans certains cas, l'énergie excédentaire stockée ne pouvant pas être évacuée normalement par le métabolisme, il peut s'en suivre une hyperthermie. La sensation d'inconfort liée à l'humidité est aussi fonction de la température ambiante $T_a$ puisque la puissance échangée sous forme latente croît avec cette température. Les figures (III. 9. A) et (III. 9. B) montrent la variation des indices de FANGER pour des valeurs d'humidité comprises entre 30 et 80%. On remarque que l'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort, à condition toutefois qu'elle soit dans des limites supportables par le système respiratoire. La limite inférieure d'humidité correspond généralement à 10 mm Hg de pression partielle de vapeur d'eau en dessous de laquelle apparaît une sensation de sécheresse des muqueuses bucco pharyngiennes. Par ailleurs, la limite supérieure est fixée à 80 % d'humidité relative au-dessus de laquelle le désagrément est dû aux condensations provoquées à ces niveaux d'humidité.

**ii/ Présentation graphique**

(a)




(b)

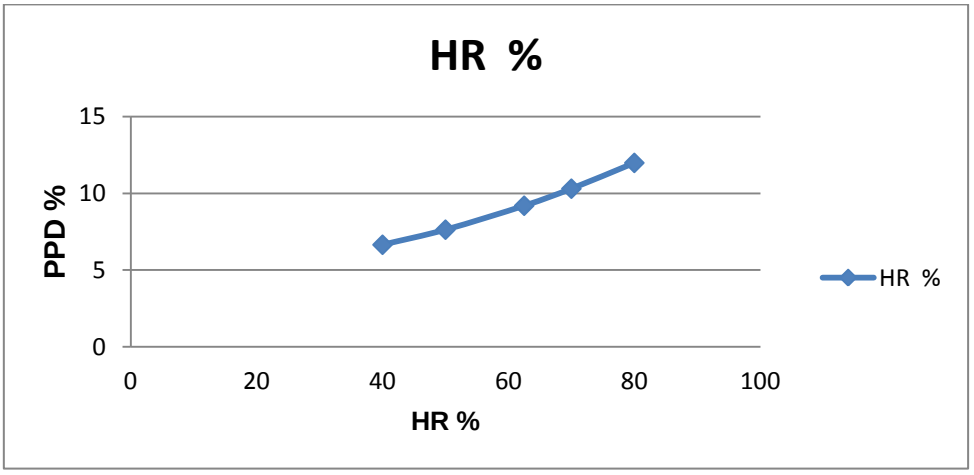



Figure III. 9 : Variation de $P_{MV}$ et $P_{PD}$ en fonction du hygrométrique de l'air ambiant ($H_R$) ($V_a$= 0.05m/s, M= 69,78 w/m², W= 0, Ta=28, $I_{cl}$ = 0.0775 m²c°/w, $T_r$= 21 °C ).

# Conclusion Générale et Recommandations

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur pour l'être humain tant pour la qualité des ambiances intérieures que pour les impacts énergétiques et environnementaux dont il est responsable. Cette étude a mis en avant le fait que la sensation de confort est complexe à définir car elle dépend d'un grand nombre de facteurs qu'ils soient inhérents à la personne au sens physiologique ou psychologique ou ceux traduisant l'ambiance de la zone dans laquelle il se situe. Il est alors normal de trouver un grand nombre d'indices définis de telle manière à caractériser la sensation de confort. Après ce constat, l'étude s'est focalisée sur deux paramètres, le Vote Moyen Prévisible ($P_{MV}$) et le Pourcentage Prévisible D'insatisfaits ($P_{PD}$) de FANGER. Ces indices ont été calculés à partir des six paramètres de base du confort thermique (les quatre grandeurs physiques de l'ambiance thermique, avec l'activité et la vêture des sujets).

Bien que les résultats soient satisfaisants, l'approche analytique de FANGER simplifie empiriquement la complexité pluridisciplinaire de la notion de confort, et néglige les interactions possibles entre l'occupant et son cadre bâti. Son application reste donc limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas, ou peu, dans le temps.

En raison de ces interactions, importantes lors des conditions climatiques changeantes ou extrêmes, l'investigation systématique du confort conduit à l'étude des interactions entre deux sous-systèmes complexes : l'occupant et le bâtiment. Cette approche propose une nouvelle lecture du confort et des échanges de flux d'énergie. Les différents points de vue permettent d'identifier les composants pluridisciplinaires, les variables de flux et les variables d'état, pour la construction d'un modèle dynamique du confort.

Il faut noter que les exigences du confort thermique ne sont pas les mêmes dans les bâtiments complètement conditionnés et dans les bâtiments à ventilation naturelle.

Enfin, à partir des paramètres physiques et biologiques, l'impression de confort appartient au domaine du ressenti. Elle peut varier d'après des facteurs d'ordre psychologique ou culturel.

Des études et analyses ont montré que les personnes ressentent un niveau de confort thermique plus faible si elles sont gênées par des nuisances d'un autre type, comme le bruit ou l'éblouissement. En plus de ces adaptations physiologiques, l'être humain modifie son comportement face aux conditions climatiques. En situation de froid, il s'habille plus chaudement, augmente son activité (marche plus rapide) ou prend une attitude de prostration (repli des membres sur le corps). Si au contraire le climat devient trop étouffant, il change de type de vêtement et adopte une posture corporelle plus étendue.

Sur la base des résultats de cette étude et dans le but d'atteindre un confort thermique satisfaisant, il est donné les recommandations suivantes :

- Adapter les bâtiments par des fenêtres double vitrage permettant de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire par rapport à la fraction absorbée, et de bénéficier de leur bonne isolation phonique. Elles réduisent sensiblement la température et l'énergie transmise.

- Intégrer la végétation dans les bâtiments pour minimiser l'émission de $C_{o2}$, constituer une barrière aux vents extrêmes et aux fortes pluies, et diminuer le rayonnement solaire.

- Orienter notre façon de construire et l'architecture des bâtiments vers une architecture écologique afin de gagner en isolation thermique et acoustique.

- Protéger notre environnement en utilisant des matériaux locaux à pouvoir isolant et recyclables ; cela permettra de minimiser les coûts de construction et la surconsommation d'énergie.

- Utiliser l'énergie propre, en optant à la mise en place d'équipements de production d'électricité et de l'eau chaude par le captage de l'énergie solaire

- Orienter la maison de manière à bénéficier d'un éclairage satisfaisant et gratuit permettant des économies de chauffage substantielles.

# Références bibographiques


**[AFNOR, 1995]. AFNOR. NF EN ISO 7730 :** *Ambiances thermiques modérées Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. Paris: AFNOR, 1995, 27p.*

**[AFNOR, 1995]. AFNOR. NF ISO 9920** : *Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire*. Paris: AFNOR, 1995, 54 p.

**[ANRH, 1993]. ANRH** : Carte des précipitations du Nord de l'Algérie,

**[ASHRAE, 1997]. ASHRAE, 1997:** *Chapter 8: Thermal Comfort. In: ASHRAE handbook of fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 1997, p8.1-8.28.*

**[ASHRAE, 1997]**. **ASHRAE** : *Chapter 9: Indoor environmental health. In: ASHRAE handbook of fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 1997, p9.1-9.24.*

**[ASHRAE handbook,2005]. ASHRAE handbook :** *thermal comfort. In: ASHRAE fundamentals handbook (SI).Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers (ASHRAE); 2005.*

**[Bassam MOUJALLED, 2007]. Bassam MOUJALLED :** *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, L'aspect physiologique : la thermorégulation. L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.*

**[Berkouk Djihed, 2017]. Berkouk Djihed**, **THÈSE en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Architecture** : *évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif : Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra, UNIV Biskra 2017.*

**[Brager, 1998]. BRAGER G.S, DE DEAR R. J:** *Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and buildings, 1998, vol. 27, n° 1, pp. 83-96.*

**[Bruant, 1997]. BRUANT Marc** : *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. Lyon, 1997.*

**[Campajola, 1989].CAMPAJOLA VIVIANA, FANCHIOTTI ALDO, GALLO CETINA, et al :** *Architecture bioclimatique. Roma: Luca Edizione d'Arte S.P.A, 1989, 88 p*.

**[Candas, 1998]. CANDAS VICTOR** : *Confort thermique In Génie énergétique. Vol. BE 4. Paris : Techniques de l'ingénieur, 1998, p. BE 9085.*

**[CANDAS Victor**, **2008]. CANDAS Victor** : *Confort thermique, 2008.*

**[Carte routière de l'Algérie]. Site Web :** *www.Carte-algérie.com.*

**[CHERGUI Mohamed Amine, 2012]. CHERGUI Mohamed Amine :** *Thème évaluation du confort thermique du corps humain dans les ambiances chaudes et froides, Université de Médéa Département de Génie de la Matière, 2012.*

**[Chaudière à micro cogénération]. Site Web:** *https://www.quelleenergie.fr/chaudiere-cogeneration*

**[Collard, 2001]. COLLARD PHILIPPE** : *Approche multicritère de l'évaluation de la qualité des ambiances intérieures : application aux bâtiments tertiaires. Thèse Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Chambéry: Université de Savoie, 2001, 215 p.*

**[Condition de confort et de logement sain Claude-Alain roulet, 2008]. Condition de confort et de logement sain Claude-Alain roulet :** *prof.TIT EPFL, Mai 2008.*

**[Corinne, M, 1999]. Corinne, M. «** *Travail à la chaleur et confort thermique ». Les notes scientifiques et techniques de l'INRS, NST 184, décembre 1999.*

**[Deoux. S , 2002]. Deoux. S :** « *Le guide de l'habitat sain », Andorra: édition medieco, Avril 2002, p.211*

[**Dr R. CANTIN, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino, 2005**]. **Dr R. CANTIN B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino** : *Complexité du confort thermique dans les bâtiments, 2005.*

**[Equipements écologique]. Site Web :** *http://isabelle.zanchetta.free.fr/ecoconfort/chapitres/chap1.htm*

**[Equipements électrique Panneaux aérovoltaïque, hybride solaire]. Site Web :** *https://www.insunwetrust.solar/blog/techno/aerovoltaique-hybride-solaire/*

**[FANGER PO]. FANGER PO** *: Thermal comfort, analysis and application in environmental engineerin, Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.*

**[FANGER (P.O)]. FANGER (P.O)** : *Thermal Comfort, Mac Graw- Hill Book Company, New York, (1973).*

**[FANGER P.O, TOFUM J, 2002]. FANGER P.O, TOFUM J** : *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.* Energy and buildings, 2002, vol. 34, n° 6, pp. 533-536.

**[FORAY J, 1983]. FORAY J :** Les *gelures de montagne. Soins 1983.*

**[FOURA Samir, 2007]**. **Foura Samir Mémoire doctorat en science** : *simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Univ Mantori Constantine, page 87, 2007.*

**[FOURA Samir, 2007]**. **Foura Samir Mémoire doctorat en science**, *simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Univ Mantori Constantine, page 116, 2007.*

**[FOURA Samir, 2007]. Foura Samir Mémoire doctorat en science** : *simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Univ Mantori Constantine, page 117-118, 2007.*

**[FOURA Samir, 2007]**. **Foura Samir Mémoire doctorat en science**, *simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Univ Mantori Constantine, page 119, 2007.*

**[GAGGE A.P, FOBELETS A.P, BERGLUND L.G, 1986]. GAGGE A.P, FOBELETS A.P, BERGLUND L.G :** *A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHARE transactions, 1986, vol. 92, Part 2B, pp. 709-731.*

**[Guide la thermique du bâtiment, 2007]. Guide la thermique du bâtiment, Aération et la ventilation par effet d'une cheminée :** *Isover, page 17, mai 2007*

**[Guide la thermique du bâtiment, 2007]. Guide la thermique du bâtiment, Climatisation naturelle avec le principe de puits canadien :** *Isover, page 17, mai 2007*

**[Guide Haute Qualité Environnementale, L'information HQE]. Guide Haute Qualité Environnementale, L'information HQE :** *La notion de confort hygrothermique > Le bilan thermique. Disponible sur* : http://www.hqe.guidenr.fr/cible-8hqe/confort-thermique-bilan-thermique.php.

**[HOFFMAN J.B, 1994]. HOFFMAN J.B :** *« Ambiances climatisées et confort thermique » les actes du COSTIC .P110, 1994*

**[HUMPHREYS, 1998, De Dear, 2002]**. **HUMBERT MYRIAM** : *Impact des paramètres de conception sur le confort d'été des grands espaces-serres. Thèse Génie Civil. Lyon: INSA Lyon, 2002, 209 p.*

**[Info météorologiques de la W. Médéa]. Info météorologiques site web :**
1/*https://fr.weatherspark.com/* , 2/*https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2019/medea/valeurs/60437.html*
3/*https://fr.weatherspark.com/*

**[Information technique sur les parois en ossature de bois]. Site Web :** *http://www.forho.fr/information-technique/#tab-1462776582182-4-4*

**[Isolant Fibre de Bois]. Site web :** *https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de bois. php*

**[JACQUES Teller, 1985]. Jacques Teller** : *notion du confort thermique, Confort Thermique, Université de Liège, 1985.*

**[JEDIDI MALEK, BENJEDDOU OMRANE, 2016]. JEDIDI, Malek. BENJEDDOU, OMRANE** : *Athermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation. Dunod, 5 rue La Romiguières, 75005 Paris, 2016.*

**[KAIDI Youcef, 2018]. KAIDI Youcef :** *Thème Etude du confort thermique dans un immeuble résidentiel, Université YAHIA Farès de MEDEA, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, 2018*

**[LAVIGNE P, 1998]. LAVIGNE, P :** *Architecture climatique, une contribution au développement durable Edi sud, Aix – en Provence, 1998.*

**[MADI Kaboré, 2015]. MADI Kaboré :** *THÈSE Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne, Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, le 27 janvier 2015)*

**[Matériaux et équipements choisir]. Site web** : *https://alternativi.fr/maison-ecologique-quels-materiaux-et-equipements-choisir/95*

**[MAZARI Mohammed, 2012]. MAZARI Mohammed :** *Thèse de magistère en architecture Etude et l'évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère publique, Univ Tizi-Ozzou, page 62, 2012***.**

**[Moujalled B, 2007]. Moujalled, B :** *« Modélisation dynamique du confort thermique », thèse de doctorat, présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon .France. 2007.*

**[Mur de fondation et plancher de sous-sol dalle en béton]. Site Web :** *www.Bricozone.be*

**[Nicol FERGUS, 2001]. NICOL FERGUS**: *Smart Controls and Thermal Comfort project: final report.* Oxford: Oxford Brookes University, 2001, 89 p.

**[NOEL DJONGYANG, RENE TCHINDA , DONATIEN NJOMO, 2010]. Noel Djongyang, René Tchinda , Donatien Njomo :** *Thermal comfort , Renewable and Sustainable Energy Reviews;2010.*

**[OLSEN B.W, 2003]. OLSEN B.W :** *« thermal confort requirement fir floors occuppied by people with bare feet », cite in : Mansouri , op cit, p273.*

**[PARSONS, 2003]. PARSONS KEN** *: Human thermal environment. 2nd Edition. London: Taylor & Francis, 2003.*

**[Produits traitement de bois]. Site Web :** *https://www.produits-traitement-bois.com/*

**[SANTAMOURIS, 2006].** S**ANTAMOURIS** : *Confort thermique adaptatif et ventilation. Université d'Athènes, Grèce, 2006.*

**[SCHREIBER, L. 1985]. SCHREIBER, L** *: Normes sur les conditions d'ambiances thermiques acceptables pour le confort, 1985, 33 p., (CS-000220).*

**[STEPHANE THIERS, 2008]. STEPHANE THIERS,** *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse. Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 2008.*

**[STOLWIJK JERRY,1971]. STOLWILK JERRY:** *Royale Univ, New Haven, CT, United J.A.J states,1971;*

**[THELLIER FRANCOISE, 1989**]. **THELLIER FRANÇOISE** : *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat, une approche de l'étude confort. Energétique. Toulouse: Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1989.*

**[THÈSE Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, 2007]. THÈSE Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés** : *en vue de l'obtention Le grade de docteur, L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon, N° d'ordre 2007-IS.*

**[Valeur dB des isolants acoustique Site Web]. Site Web :** *https://books.google.dz/books?id=fFHQzRhCDL0C&pg=PA94&lpg=PA94&dq=valeur+db+fondation&source=bl&ots=PZBgtf5LQ7&sig=ACfU3U2QG8rHsXt_hlRaSuU31RF7eUxWVA&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj8rYvLrLLqAhWwzYUKHcfYAnwQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=valeur%20db%20fondation&f=false*

**[VOGT J.J, 1995]. VOGTT J.J :** *« confort physiologique .technique de l'ingénieur».B2180,p 10, 1995.*

## Les normes :

**[ISO 7730, 1994]. ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées** : *Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. AFNOR. Paris, 1994.*

**[ISO 7726, 2002]. ISO 7726** : **Ergonomie des ambiances thermiques** *: Appareil de mesure des grandeurs physiques*. Paris: AFNOR, 2002, 54 p.

**[ISO 8996, 2004]. ISO 8996 : Ergonomie de l'environnement thermique** *: Détermination du Métabolisme énergétique*, 2004.

**[ISO 9920, 1995]. ISO 9920 : Ergonomie des ambiances thermiques** *: Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire*. Paris: AFNOR, 1995, 54 p.

# A N N E X E S

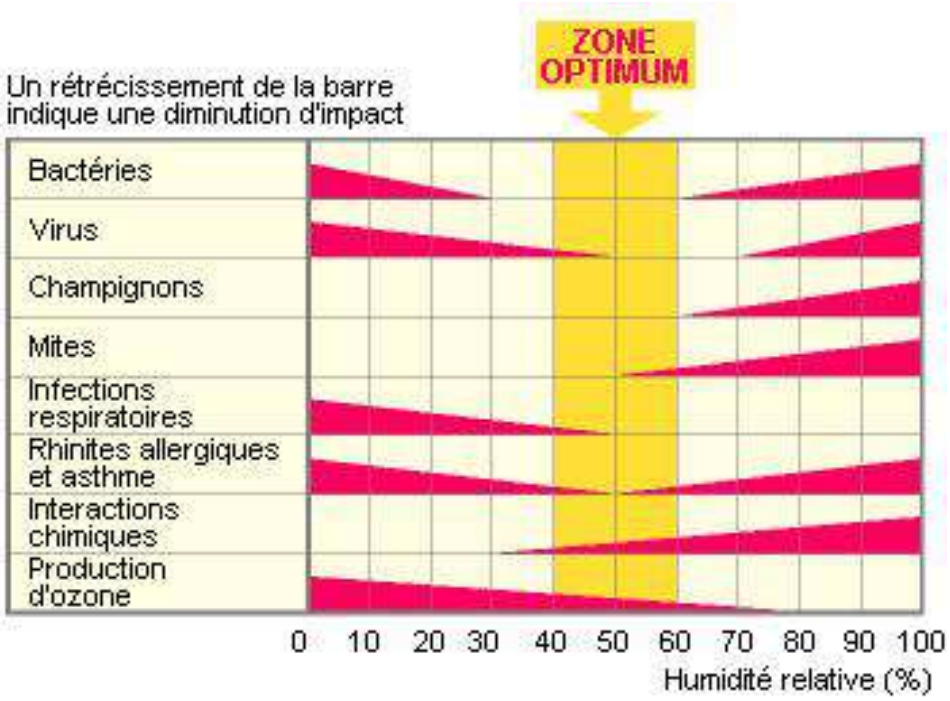
**ANNEXE N°1 : Plage de taux d'humidité optimal**

De faibles niveaux d'humidité (<30 %) donnent lieu à certains problèmes :

- ✓ Augmentation de l'électricité statique
- ✓ Augmentation de la concentration en poussières dans l'air, ce qui serait susceptible d'induire une augmentation de la fréquence de maladies respiratoires en hiver lorsque l'humidité de l'air est faible.

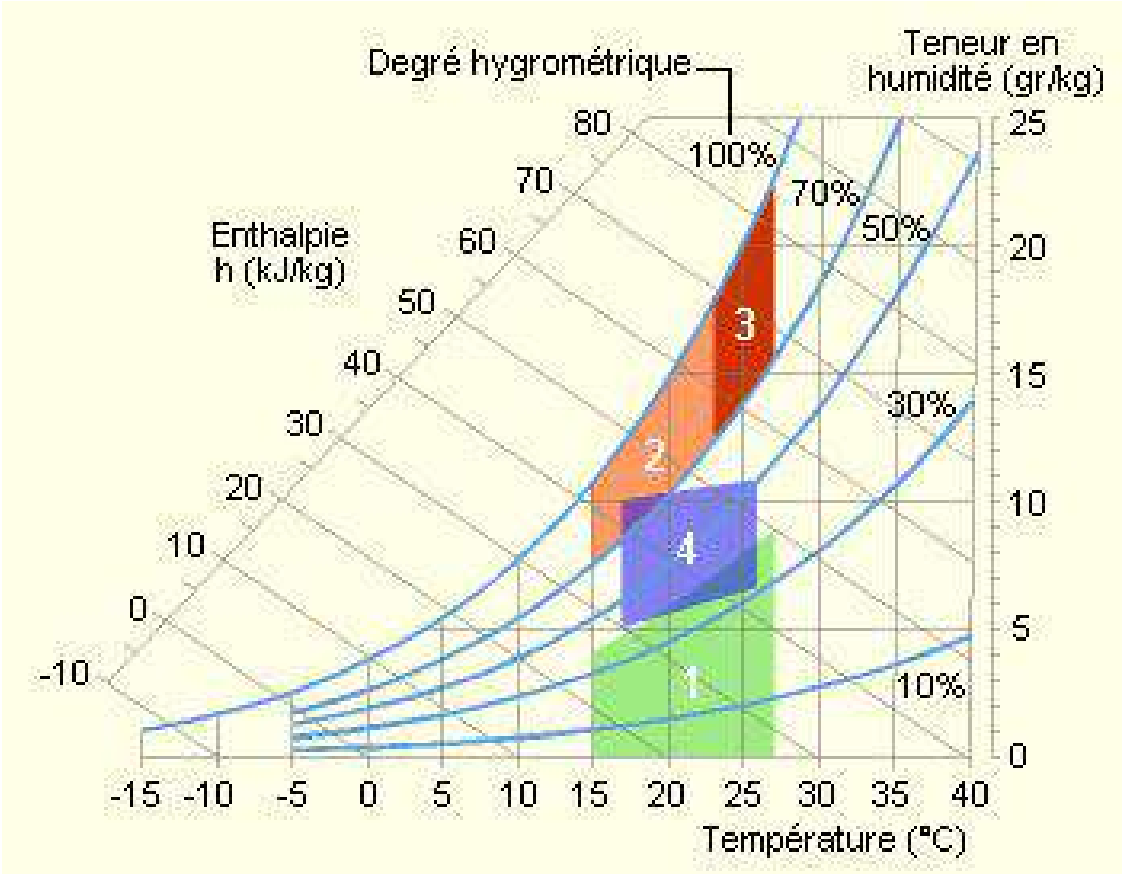
De hauts niveaux d'humidité (>70 %) donnent lieu à une croissance microbienne importante et à des condensations sur les surfaces froides.

Le diagramme ci-dessous indique, la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique (D'après Scofield et Sterling) (Doc.Dri-Steem/Pacare).



**ANNEXE N°2 : Plage de confort hygrothermique**

Le diagramme suivant permet de déterminer la plage de confort hygrothermique (l'air humide). (Stéphane THIERS, 2008)




1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.

2. et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.

3. : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.

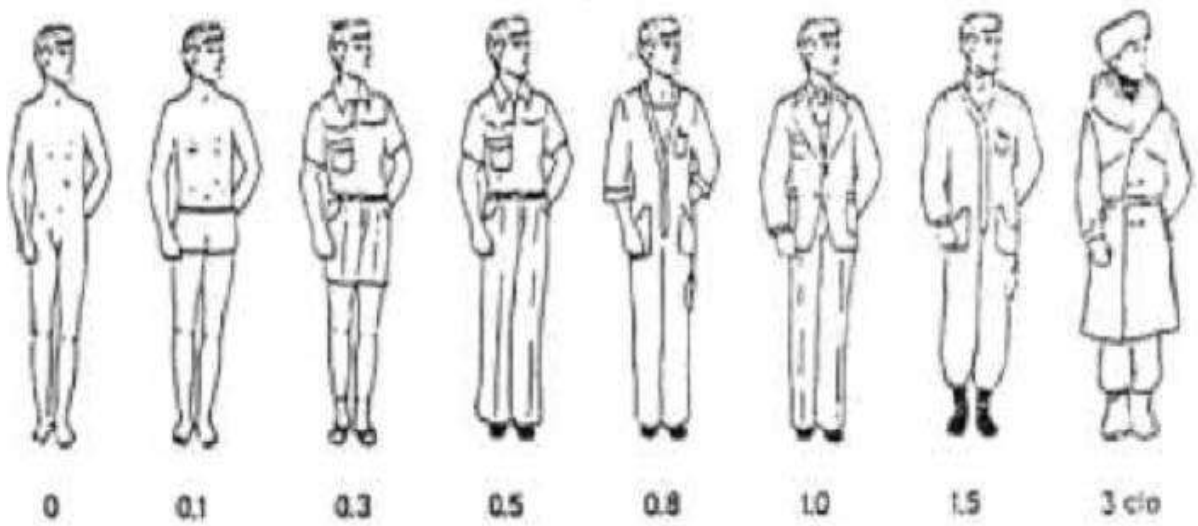
4. : Polygone de confort Hygrothermique

**ANNEXE N°3 : L'unité de résistance thermique des vêtements (Clo)**

Le clo est l'unité de résistance thermique des vêtements. Par définition, les vêtements avec une résistance thermique de 1 clo maintiennent le confort thermique d'une personne assise dans un environnement où la température ambiante est de 21°C et la vitesse de mouvement de l'air est de 0,1 m/s.

1 clo = 0,1555 $m^2$. °C/W

| Tenue Vestimentaire | Niveau d'habillement (Clo) |
|---|---|
| Nu | 0 |
| Short | 0.1 |
| Tenue tropicale | 0.3 |
| Tenue légère d'été | 0.5 |
| Tenue de travail | 0.7 |
| Tenue pour l'hiver d'intérieur | 1.0 |
| Tenue de ville traditionnelle | 1.5 |



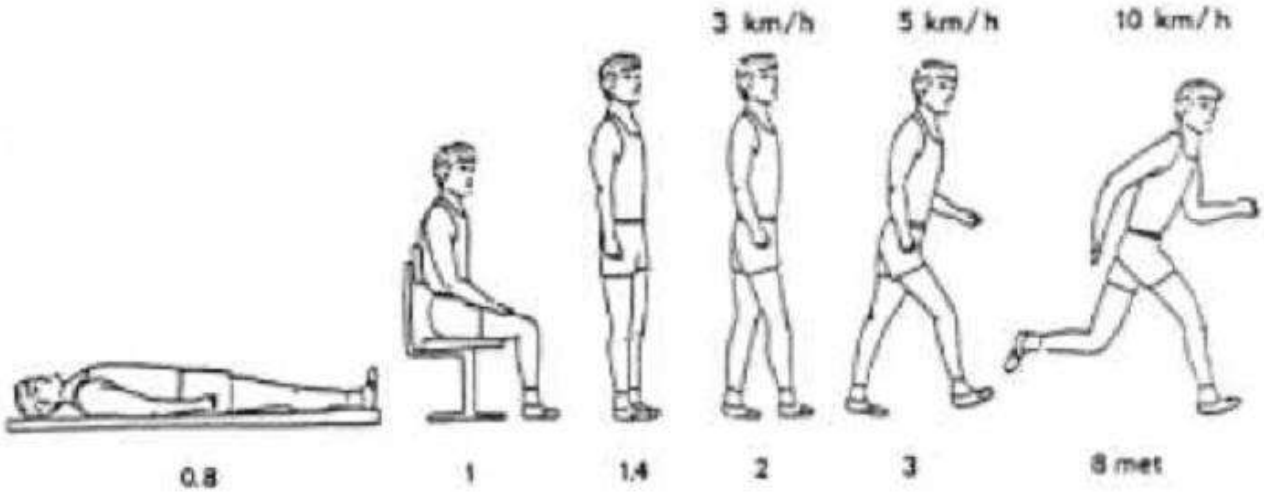
**ANNEXE N°4 : L'unité d'énergie métabolique (Met)**

Le met est l'unité d'énergie métabolique. Le métabolisme, est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C.

1 met = 58 W/m²

(Où la surface du corps humain est d'environ 1,8 m²).

| Activité | Met |
|---|---|
| Repos, couché | 0.8 |
| Repos, assis | 1 |
| Activité, légère (bureau, école…) | 1.2 |
| Activité légère debout (laboratoire…) | 1.6 |
| Activité moyenne debout (travail sur machine…) | 2.0 |
| Activité soutenue (travail lourd sur machine…) | 3.0 |



**ANNEXE N°5 : La pression saturante et partielle de la vapeur d'eau**

La pression de vapeur saturante ou tension de vapeur est la pression à laquelle la phase gazeuse de cette substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide. Elle dépend de la température. Certains utilisent le terme " pression de vapeur ", mais celui-ci est ambigu car il évoque la pression partielle de la vapeur.

$$\ln p_S = 13{,}7 - \frac{5120}{T}$$

Où

$P_s = e\left[16.65 - 4030.18/(T_a + 235)\right]$, par (ASHRAE,2004)

Dans un mélange, c'est la pression d'un des composants du mélange ; elle est égale à la pression qu'aurait ce composant s'il occupait seul, dans les mêmes conditions, tout le volume occupé par le mélange. La pression du mélange est la somme des pressions partielles de chacun des composants.

Pour l'air humide, la pression atmosphérique est la somme des pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau.

A saturation, on a la pression partielle de vapeur saturante Ps

$$P_a = P_s . H_r . 10$$

PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

| Tempé-rature [°C] | Pr. de vapeur saturante [Pa] | Tempé-rature [°C] | Pr. de vapeur saturante [Pa | Tempé-rature [°C] | Pr. de vapeur saturante [Pa | Tempé-rature [°C] | Pr. de vapeur saturante [Pa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - 29 | 42,17 | - 9 | 283,93 | 11 | 1312,7 | 31 | 4495,9 |
| - 28 | 46,73 | - 8 | 309,98 | 12 | 1402,6 | 32 | 4758,5 |
| - 27 | 51,74 | - 7 | 338,19 | 13 | 1497,8 | 33 | 5034,3 |
| - 26 | 57,25 | - 6 | 368,74 | 14 | 1598,75 | 34 | 5323,9 |
| - 25 | 63,29 | - 5 | 401,76 | 15 | 1705,5 | 35 | 5627,8 |
| - 24 | 69,91 | - 4 | 437,47 | 16 | 1818,4 | 36 | 5946,6 |
| - 23 | 77,16 | - 3 | 476,06 | 17 | 1938,0 | 37 | 6281,0 |
| - 22 | 85,10 | - 2 | 517,72 | 18 | 2064,3 | 38 | 6631,5 |
| - 21 | 93,78 | - 1 | 562,67 | 19 | 2197,8 | 39 | 6998,7 |
| **- 20** | **103,26** | **0** | **611,15** | **20** | **2338,8** | **40** | **7383,5** |
| - 19 | 113,62 | 1 | 657,1 | 21 | 2487,7 | 41 | 7786,3 |
| - 18 | 124,92 | 2 | 706,0 | 22 | 2644,8 | 42 | 8208,0 |
| - 17 | 137,25 | 3 | 758,0 | 23 | 2810,4 | 43 | 8649,2 |
| - 16 | 150,68 | 4 | 813,5 | 24 | 2985,1 | 44 | 9110,7 |
| - 15 | 165,30 | 5 | 872,5 | 25 | 3169,2 | 45 | 9593,2 |
| - 14 | 181,22 | 6 | 935,3 | 26 | 3363,1 | 46 | 10097,6 |
| - 13 | 198,52 | 7 | 1002,0 | 27 | 3567,3 | 47 | 10624,6 |
| - 12 | 217,32 | 8 | 1072,8 | 28 | 3782,2 | 48 | 11175,1 |
| - 11 | 237,74 | 9 | 1148,1 | 29 | 4008,3 | 49 | 11750,0 |
| **- 10** | **259,90** | **10** | **1228,0** | **30** | **4246,0** | **50** | **12349,9** |

**ANNEXE N°6 : La température du globe noire**

En pratique, on mesure la température du globe noir (tg °C) au moyen du thermomètre à globe noir. L'élément sensible du thermomètre est placé au centre d'une sphère complètement fermée, dans un matériau conduisant bien la chaleur (en cuivre) et peinte en noir mat, de manière à capter le plus possible le rayonnement thermique venant de l'environnement. La température de ce globe est influencée par la température de l'air, le rayonnement et la vitesse de l'air. Après 20 à 30 minutes (selon la capacité thermique de l'ensemble), le globe et le thermomètre atteignent une température d'équilibre, la température du globe noir tg.

Cette température est donc fonction du rayonnement, mais aussi des paramètres $t_a$ et $v_a$ et également du diamètre du globe.

