**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement superieur et de la recherche scientifique**

**Université d'Adrar**
**Faculté des sciences et de la technologie**
**Départment des sciences de la matière**

**Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Physique Energétique**

---

# Humidification de l'air d'un local par pulvérisation d'eau dans un milieu saharien

---

***Présenté par :***
EL HAMZAOUI Narimane
***Encadrer par :***
Mr.KHELIFI Cherif
(URER.MS d'Adrar)

***Président de jury :***
Mr.BOUSSOUKAIA Tahar
***Membre de jury :***
Mr.GUENFOUD Mohamed

Soutenance le 18 Décembre 2013

# *Dédicaces*

*A mes parents :*

*Sans vous je ne serais jamais arrivé là, les mots ne suffisent pas pour décrire ce que je porte pour vous deux, que Allah vous garde pour moi heureux et en bonne santé.*

*A la mémoire de mon oncle Salah :*

*j'aurai bien voulu que tu assistes à ce moment, fier de moi ...*

*A mon frère chéri Ahmed « Mimou »*

*A mes sœurs chéries : Lilia, Nardjes-Yasmine, Amira-Nour*

*Nana*

# *Remerciements*

**Q**uel moment plaisant dans la rédaction d'une thèse, d'un PFE ou d'un mémoire, que celui où l'on arrive aux « Remerciements ».

**C**e mémoire a été réalisé au département des sciences de la matière de la faculté des sciences et sciences de l'ingénieur à l'université africaine Ahmed DRAYA d'Adrar ;

**A**u terme de ce mémoire, je remercie tout d'abord *Allah* le tout puissant de m'avoir permis de réaliser ce travail.

**J**'adresse mes sincères remerciements à monsieur **KHELIFI Cherif** chargé de recherche en Héliothechnique à l'URER\MS d'Adrar, de m'avoir proposé ce thème et d'avoir accepté de m'encadrer et de m'orienter pour mener à bien ce travail, qu'il trouve ici l'expression de mon profond sentiment ;

**J**e tiens à remercier monsieur **BOUSSOUKAIA** d'avoir bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de ce travail ;

**J**e remercie également monsieur **GUENFOUD** d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner mon travail.

**M**es remerciments à monsieur **BOUAZIZ** qui a été présent pour me soutenir et m'aider à terminer ce travail ;

**M**erci infiniment à **Nasreddine KAROUR** pour les bons moments qu'on a partagé, les idées brillantes qu'il m'a procuré, pour sa disponibilité et son aide ;

*Narimane*

# Table des matières

**Dédicaces** i

**Remerciements** ii

**Table des matières** iii

**Liste des figures** vii

**Liste des tables** viii

**Glossaire** ix

**Notions et symboles** xiii

**Résumé** xiv

**Abstract** xv

**Introduction** 1

**I Partie théorique** 3

**I Introduction au Conditionnement de l'air** 4

I.1 Conditionnement de l'air . . . . . 4

I.1.1 L'objectif du conditionnement de l'air . . . . . 4

I.1.2 La nécessité du conditionnement de l'air . . . . . 4

I.1.3 Les raisons pour conditionner/humidifier l'air . . . . . 5

I.1.3.1 Coté économie : . . . . . 5

I.1.3.2 Réalisation d'un environnement agréable . . . . . 5

I.1.3.3 Elimination des décharges électrostatiques . . . . . 5

I.1.3.4 Eviter le séchage de stock ou matériel entreposé . . . . . 5

I.1.3.5 Refroidissement de l'air . . . . . 5

I.1.4 Critères de décision pour humidifier l'air . . . . . 5

I.1.5 Conditions d'ambiance pour le conditionnement de l'air . . . . . 6

I.1.5.1 Température intérieure $T_i$ . . . . . 6

I.1.5.2 Humidité intérieure . . . . . 6

I.1.5.3 Renouvellement d'air neuf . . . . . 6

I.1.5.4 Débit d'air soufflé . . . . . 7

I.2 Composition d'un système de conditionnement de l'air . . . 7
I.3 Grandeurs caractéristiques d'un système de conditionnement d'air . . . 7
I.3.1 Les conditions de base extérieures . . . 7
I.3.1.1 Les conditions de base hivernales . . . 8
I.3.1.2 Les conditions de base estivales . . . 8
I.3.2 Les conditions de base intérieures . . . 8
I.3.2.1 Le confort thermique . . . 8
I.3.2.2 Echanges thermiques entre le corps humain et son environnement . 8
I.3.2.3 Equation du confort thermique . . . 9
I.3.2.4 Les facteurs qui influencent le confort thermique . . . 9
I.3.2.5 Indice du confort thermique . . . 10
I.4 Les charges d'un local . . . 11
I.4.1 Charges thermiques . . . 11
I.4.1.1 Charges sensibles externes . . . 11
I.4.1.2 Charges sensibles internes . . . 11
I.4.2 Charges hydriques . . . 11
I.4.3 Charges totales ou enthalpiques . . . 11
I.4.4 Les différents apports de chaleur . . . 12
I.5 Le calcul des charges . . . 13
I.5.1 Importance de l'appréciation des charges . . . 13
I.5.2 Les différentes méthodes de calcul des charges . . . 13

**II Humidification par pulvérisation Pulvérisation d'eau 14**
II.1 Humidification de l'air . . . 14
II.1.1 Humidification isothermique . . . 14
II.1.2 Humidification adiabatique . . . 14
II.1.3 Technologies d'humidification de l'air . . . 14
II.1.3.1 Les systèmes à vapeur . . . 14
II.1.3.2 Les systèmes type « laveur » . . . 15
II.1.3.3 Les systèmes à pulvérisation fine . . . 15
II.1.4 L'humidificateur par pulvérisation d'eau . . . 15
II.1.4.1 Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau 15
II.1.4.2 Technologie des appareils à pulvérisation . . . 16
II.1.4.3 Les avantages et les inconvénients des humidificateurs par pulvérisation 18
II.2 Grandeurs d'état de l'air humide importantes pour l'humidification de l'air . . . 19
II.2.1 Propriétés de l'air humide . . . 19
II.2.2 Enthalpie . . . 19
II.2.3 Températures caractéristiques de l'air humide . . . 20
II.2.3.1 Température de bulbe sec . . . 20
II.2.3.2 Température de rosée . . . 20
II.2.3.3 Température de bulbe humide . . . 20
II.2.4 La psychrométrie . . . 20
II.2.5 Le psychromètre . . . 21
II.3 Diagrammes de l'air humide . . . 21
II.4 L'hygrométrie de l'air . . . 24
II.4.1 L'hygrométrie . . . 24
II.4.2 humidité absolue . . . 24

II.4.3 humidité relative ou hygrométrie . . . 24
II.4.4 humidité spécifique . . . 24
II.4.5 Air saturé . . . 24
II.4.6 Degré de saturation . . . 25
II.4.7 Teneur de l'air en humidité . . . 25
II.4.8 Mesure de l'hygrométrie . . . 25
II.4.8.1 Thermomètre à bulbe sec et à bulbe humide . . . 25
II.4.8.2 Calcul de la charge d'humidité . . . 26
II.5 Changement d'état de l'air humide . . . 27
II.5.1 Variation de la seule température de l'air . . . 27
II.5.2 Variation de la seule humidité absolue de l'air . . . 27
II.5.3 Variation simultanée de la température et de l'humidité absolue . . . 27
II.5.3.1 Cas ou il ya humidification adiabatique de l'air (humidificateurs adiabatiques) . . . 28
II.5.3.2 Cas ou il ya humidification non adiabatique de l'air (humidificateur-laveurs non adiabatiques) . . . 29
II.5.3.3 Cas des tours de refroidissement . . . 29
II.6 L'eau : Les notions importantes pour l'humidification de l'air . . . 30
II.6.1 Les notions importantes pour l'humidification de l'air . . . 30
II.6.1.1 La notion de dureté de l'eau . . . 30
II.6.1.2 La valeur du pH . . . 30
II.6.1.3 Le Degré hydrotimétrique de l'eau . . . 30
II.6.1.4 Eau de différents Degrés hydrotimétriques . . . 31
II.6.2 Les composants de l'eau . . . 31
II.6.3 Critères de la nécessité du traitement de l'eau . . . 32
II.6.4 Possibilité du traitement de l'eau . . . 32
II.6.5 Traitement de l'eau après l'humidificateur . . . 33
II.6.6 Parcours d'absorption . . . 33
II.6.6.1 Les facteurs qui influencent le parcours d'absorption . . . 33

**II Partie pratique 34**

**III Application : Calcul des charges et du confort thermique 35**
III.1 Les apports thermiques . . . 35
III.2 Types des charges estivales . . . 35
III.2.1 Charges thermiques par les parois vitrées . . . 35
III.2.1.1 Charges thermiques dues à l'ensoleillement . . . 36
III.2.1.2 Charges dues à la transmission thermique . . . 37
III.2.2 Charges thermiques par les parois opaques . . . 37
III.2.3 Charges thermiques dues au renouvellement d'air . . . 38
III.2.3.1 Charges thermiques sensibles . . . 38
III.2.3.2 Charges thermiques latentes . . . 38
III.2.4 Charges thermiques dues aux occupants . . . 39
III.2.5 Charges thermiques dues à l'éclairage et aux appareils électroménagers . . . 39
III.2.5.1 Charge dues à l'éclairage . . . 39
III.2.5.2 Charges dues aux appareils électroménagers . . . 40

III.3 Programme de calcul des charges thermiques . . . . . 40
III.4 Caractéristiques et fonctions du programme . . . . . 40
III.5 Traitement des données expérimentales . . . . . 43
III.6 Description de l'humidificateur utilisé . . . . . 43
III.6.1 Caractéristiques de l'humidificateur . . . . . 44
III.7 Description du local . . . . . 44
III.8 Représentation de l'évolution des caractéristiques du système . . . . . 44
III.8.1 Température . . . . . 44
III.8.2 L'humidité du système . . . . . 46
III.8.2.1 L'humidité relative du local . . . . . 46
III.8.2.2 L'humidité absolue du local . . . . . 46
III.8.3 L'enthalpie du système . . . . . 47
III.8.4 Charge thermique du système . . . . . 48
III.8.5 Pression partielle . . . . . 49
III.8.6 La variation du rayonnement solaire . . . . . 51
III.9 L'évolution du confort thermique du local . . . . . 51
III.9.1 Calcul du confort thermique . . . . . 51
III.9.1.1 L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait PPD . . . . . 52
III.10 Résultats et discussion . . . . . 54
III.10.1 Explications générales . . . . . 54
III.10.2 Résultats de l'expérience . . . . . 54
III.10.3 Discussion des résultats obtenus . . . . . 55
III.10.3.1 Discussion des résultats de température . . . . . 55
III.10.3.2 Discussion des résultats d'humidité . . . . . 55
III.10.3.3 Les consignes prescrites sur les températures et l'humidité . . . . . 56
III.10.3.4 Discussion des résultats de confort thermique . . . . . 56
III.10.3.5 Discussion de l'efficacité de l'humidificateur et la consommation d'eau 56
III.11 Les codes sources utilisés dans l'application . . . . . 57
III.11.1 Calcul de l'enthalpie . . . . . 57
III.11.2 Calcul des températures du local . . . . . 57
III.11.3 Calcul des humidités relatives du local . . . . . 57
III.11.4 Calcul des humidités absolues du local . . . . . 58
III.11.5 Calcul de la charge thermique du local . . . . . 58
III.11.6 Confort thermique . . . . . 58

**Conclusion** **60**

**Index** **61**

**Bibliographie** **62**

# Table des figures


I.1 Exemple de composition d'une centrale de traitement de l'air . . . . . 7
I.2 Résumé de l'origine des différentes charges à prendre en compte dans le calcul d'une installation de conditionnement de l'air . . . . . 12

II.1 Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau . . . . . 16
II.2 Humidificateurs centrifuges . . . . . 16
II.3 humidificateur-laveur . . . . . 17
II.4 Humidificateurs à ultrasons . . . . . 17
II.5 Exemple de diagramme de l'air humide . . . . . 22
II.6 les éléments qui composent un diagramme de l'air humide . . . . . 23
II.7 Hygromètre à cheveux . . . . . 26
II.8 Létat final de l'air suite au mélange de deux masse d'air d'états initiaux 1 et 2 . . . 28
II.9 Humidification adiabatique de l'air par injection d'eau . . . . . 29

III.1 Fenêtre principale du programme bilan thermique . . . . . 41
III.2 Boite de dialogue : choix du type d'affichage des résultats sous forme de graphes ou sous forme numérique . . . . . 41
III.3 Affichage des résultats sous forme de valeurs numériques . . . . . 42
III.4 Affichage des résultats sous forme de valeurs numériques . . . . . 42
III.5 Coupe en perspective d'humidificateur d'air [16] . . . . . 43
III.6 Évolution de la température humide de l'air et des températures sèches du local avant et après humidification . . . . . 45
III.7 Variation de l'humidité relative du local avant et après humidification . . . . . 46
III.8 Variation de l'humidité absolue du local avant et après humidification . . . . . 47
III.9 Variation de l'enthalpie avant et après humidification . . . . . 48
III.10 L'évolution de la charge thermique du local en fonction du temps . . . . . 49
III.11 L'évolution de la pression partielle du local avant humidification . . . . . 50
III.12 L'évolution de la pression partielle du local après humidification . . . . . 50
III.13 La variation du rayonnement solaire . . . . . 51
III.14 Variation du confort thermique du local avant et après humidification . . . . . 52
III.15 L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait *PPD* avant humidification . . . . 53
III.16 L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait *PPD* après humidification . . . . 54

# Liste des tableaux


I.1 Critères de décision pour humidifier l'air . . . . . 6
I.2 Exemple de débits de renouvellement d'air par type de local . . . . . 6
I.3 Échelle de sensation thermique . . . . . 10

II.1 Différents types d'humidificateur . . . . . 15
II.2 Détérmination des valeurs du pH de l'eau . . . . . 30
II.3 Différentes définitions du degré hydrotimétrique . . . . . 30
II.4 Table de conversion en différents degrés hydrotimétriques étrangers . . . . . 31
II.5 Eau de différents Degrés hydrotimétriques . . . . . 31
II.6 Dureté des carbonates . . . . . 31
II.7 Dureté permanente de l'eau . . . . . 32

III.1 Facteurs solaires du vitrage . . . . . 36
III.2 Facteurs solaires de la menuiserie . . . . . 36
III.3 La valeur du $C_p$ en fonction de la couleur du parement extérieur de la paroi . . . . . 37
III.4 Puissance des appareils en fonction de la durée de fonctionnement . . . . . 40
III.5 Caractéristiques de l'humidificateur par pulvérisation d'eau utilisé . . . . . 44
III.6 Caratéristiques du local . . . . . 44
III.7 Les résultats de l'expérience . . . . . 55

# Glossaire

*Ce glossaire a été conçu dans le but d'éclaircir le sens des mots utilisés dans ce travail et ainsi de préciser la terminologie employée dans ce domaine.*

## A

***Adiabatique :*** *signifie « sans échange de chaleur ».*
***Aérosols :*** *des suspensions quasi stables de particules d'agrégats solides ou liquides. Leur stabilité dépend de leur tension superficielle.*
***Air conditionné :*** *air dont la chaleur, l'humidité et la pression sont réglées en fonction de l'atmosphère extérieure ou de l'usage que l'on en fait. C'est-à-dire l'air conditionné est un air auquel on a affecté une température et un degré d'humidité déterminés.*
***Air humide :*** *l'air ne se présente dans la nature que sous la forme humide (l'air atmosphérique). Mélange en proportion variable d'air sec et de vapeur d'eau.*
***Air sec :*** *dans la littérature l'air sec est parfois désigné par « air pur »Mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, de l'argon, du dioxyde de carbone et, en faibles quantités, un certain nombre d'autres gaz (Néon, Hélium, Krypton, Xénon, Méthane, Hydrogène, etc.). Les proportions de ces différents gaz, tout en variant légèrement en fonction du temps et du lieu, peuvent être considérées en première approximation comme constantes (air de référence).*

## C

***Capacité thermique massique*** $c_p$ ***:*** *de l'air dépend de sa température et de son humidité. La variation de la valeur de* $c_p$ *est négligeable dans les conditions de température et humidité utilisées en conditionnement de l'air.*
***Charges :*** *On appelle « charges »les facteurs physiques intérieurs et extérieurs qui perturbent la température et l'hygrométrie d'un bâtiment.*
***Charge thermique du local :*** *on distingue les charges instantanées qui agissent immédiatement sur* $T_i$ *(rayonnement solaire sur une vitre, renouvellement d'air extérieur) et les charges différées qui agissent avec un certain retard (charges climatiques au travers des parois plus ou moins inertes, charges internes). On notera que la charge différée se fait également sentir pendant un certain temps, même après arrêt de la source.*
***Climatisation :*** *elle consiste dans le maintien d'un niveau de confort pour les occupants d'un local (domaine résidentiel, tertiaire...). La climatisation est un système permettant de maintenir l'atmosphère d'un milieu à une pression, un degré d'humidité et une température choisis.*
***Climatiser :*** *au moyen d'une circulation d'air traité, maintenir à des conditions déterminées, de température et d'humidité notamment, et régénérer l'air, l'atmosphère d'une enceinte.*
***Conditionnement d'air :*** *le conditionnement de l'air est le processus de traité l'air d'un environnement interne afin de créer et maintenir les conditions standards de température, humidité,*

*qualité de l'air et le mouvement de l'air.*
***Différencier entre air conditionné et climatisation :*** *L'action de soumettre l'air aux conditions de température, d'humidité et de pression choisis est le conditionnement de l'air. On conditionne l'air pour qu'il soit agréablement respirable et plus sain ou pour qu'il se prête correctement à certains travaux, à certaines expériences.*
*La climatisation : est le « conditionnement de l'air dans une salle ou dans un véhicule ». On dit d'une salle dont l'air a été conditionné qu'elle est climatisée. Le dispositif employé pour climatiser une salle est un conditionneur d'air, s'il s'agit d'un simple appareil ou une installation de climatisation s'il s'agit d'un ensemble d'appareils. Un climatiseur est un « conditionneur d'air d'appartement ». Il est correct de dire que l'air d'une salle climatisée est conditionné.*
***Coefficient de déperdition par transmission*** $\mathbf{H}$, **en** $\mathbf{W/K}$ ***:*** *Flux thermique cédé par transmission entre l'espace chauffé et l'extérieur, pour une différence de température d'un Kelvin entre les deux ambiances. Les températures intérieure et extérieure, sont supposées uniformes.*
***Coefficient de transmission surfacique*** $\mathbf{U}$, **en** $\mathbf{W/(m^2.K)}$ ***:*** *Flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, pour une différence de température d'un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.*
***Coefficient de transmission linéique*** $\mathbf{Y}$, **en** $\mathbf{W/(m.K)}$ ***:*** *Flux thermique en régime stationnaire par unité de longueur, pour une différence de température d'un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.*
***Coefficient de transmission ponctuel*** $\mathbf{X}$, **en** $\mathbf{W/K}$ ***:*** *Flux thermique en régime stationnaire ramené à un point, pour une différence de température d'un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.*
***Coefficient de transmission surfacique « équivalent »d'une paroi*** $\mathbf{U_e}$, **en** $\mathbf{W/(m^2.K)}$ ***:*** *Coefficient de transmission surfacique tenant compte à la fois des caractéristiques intrinsèques de la paroi et de son environnement (sol, vide sanitaire, sous-sol non chauffé ...)*
***Conductivité thermique*** $(\mathbf{Lambda}, \mathbf{Lda})$, **en** $\mathbf{W/(m.K)}$ ***:*** *Flux thermique par mètre carré, traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour une différence de température d'un Kelvin entre les deux faces de ce matériau.*

## D

***Diagramme de l'air humide :*** *le diagramme de l'air humide permet de connaître rapidement et simplement les paramètres de l'air d'un état initial à un état final et par différence de savoir la quantité d'eau à ajouter ou à soustraire pour changer d'état.*

## E

***Enthalpie :*** *est calculée par le régulateur à partir des mesures de température et d'humidité relative. On adopte habituellement les conventions suivantes :*

- ***enthalpie de l'air sec :*** *on se fixe la valeur 0 pour l'air sec à 0 ˚C ;*
- ***enthalpie de l'eau :*** *on se fixe la valeur 0 pour l'eau* ***liquide*** *à 0 ˚C.*

## F

***Filtrer :*** *consiste à éliminer d'un fluide gazeux tout ou partie des particules ou aérosols qu'il contient, en les retenant sur une couche poreuse appelée « média filtrant ».*
***Flux thermique en W :*** *Quantité de chaleur transmise à (ou fournie par) un système, divisée par le temps.*

## H

***Hygrométrie :*** *le mot hygrométrie (hygro : humidité, métrie : mesure) signifie Mesure et étude de l'humidité de l'air. L'hygrométrie détermine le degré d'humidité dans l'air atmosphérique.*

## I

***Inertie thermique :*** *est la capacité d'un bâtiment à emmagasiner de la chaleur ou de la fraîcheur. Elle est essentiellement déterminée par le mode constructif, le poids de la construction et les matériaux utilisés.*
***Forte-inertie :*** *La propriété des constructions à forte inertie est de conserver une température stable et de se réchauffer ou se refroidir très lentement.*
***Faible-inertie :*** *Les constructions à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de la température.*

## M

***Méthodes de calcul des charges :*** *il existe de nombreuses méthodes de calcul des charges (ASHRAE, CARRIER, AICVF ... etc).*

## P

***Paroi opaque isolée :*** *Paroi opaque dont le coefficient de transmission thermique U n'excède pas 0.5* $W/(m^2.K)$ *soit une résistance totale minimale égale à 2* $m^2.K/W$.
***Paroi transparente ou translucide :*** *Paroi dont le facteur de transmission lumineux (hors protection mobile éventuelle) est égal ou supérieur à 0.05. Dans le cas contraire elle est dite opaque.*
***Paroi verticale ou horizontale :*** *Une paroi est dite verticale lorsque l'angle de cette paroi avec le plan horizontal est supérieur ou égal à 60 degrés, elle est dite horizontale lorsque cet angle est inférieur à 60 degrés.*
***Psychrométrie :*** *Psychrométrie le mot psychrométrie est un terme technique (du grec psychro : froid, frais), la psychrométrie désigne les caractéristiques physiques et thermodynamiques d'un mélange gaz-vapeur. L'air humide étant un mélange gaz-vapeur, l'étude des ses caractéristiques est appelée « Psychrométrie ».*
***Processus adiabatique :*** *il n'y a pas augmentation de l'enthalpie (chaleur totale) mais une modification du rapport chaleur sensible/chaleur latente apparaît.*

## R

***Rapport psychrométrique*** *le rapport psychrométrique relie l'humidité absolue et l'humidité maximale avec la différence entre la température de bulbe humide et celle de saturation adiabatique*
***Réfrigération :*** *la réfrigération est un abaissement programmé de la température du milieu (production de froid).*
***Régulation :*** *il y a une régulation lorsque le système procéde de lui-même, sans intervention humaine, au contréle et avertit l'organe de réglage lorsqu'un évènement imprévu se produit.*
***Régulation de température :*** *en régulation de température seule, la comparaison s'effectue sur la température (extérieure et de reprise ou ambiante).*
***Régulation de température et d'humidité :*** *en régulation de température et d'humidité, la comparaison s'effectue sur l'enthalpie.*

***Régulation de l'économiseur :*** *la régulation de l'économiseur compare les énergies et place les registres selon les demandes de régulation.*
***Résistance thermique*** $\mathbf{R}$, **en** $\mathbf{m^2.K/W}$ ***:*** *Inverse du flux thermique à travers un mètre carré d'un système pour une différence de température d'un kelvin entre les deux faces de ce système.*
***Résistance superficielle*** $\mathbf{R_s(R_{si}}$ **et** $\mathbf{R_{se})}$, **en** $\mathbf{m^2.K/W}$ ***:*** *Inverse du flux thermique passant par mètre carré de paroi, de l'ambiance à la paroi pour une différence de température d'un kelvin entre celles-ci.*

## S

***Source d'humidité :*** *la source d'humidité peut être :*
- *de l'eau finement pulvérisée et projetée dans le flux d'air où elle se transforme en vapeur.*
- *de la vapeur produite :*
  - *soit indépendamment dans un circuit de distribution alimenté par une chaudière de production de vapeur,*
  - *soit par un dispositif incorporé.*

***Spécifique :*** *Ce terme signifie généralement relatif, normalisé, par rapport à ... etc.*

# Notions et symboles

*En l'absence de désignation et de symboles normalisés, nous avons adopté les désignations et symboles en cours au Comité Scientifique et Technique des Industries du Chauffage et de la Climatisation (COSTIC) :*

- *les grandeurs* ***massiques*** *seront représentées par un * en exposant ($m*$, $V*$, $H*$) bien que la norme recommande $\rho$, $v$ et $h$ ;*
- *les grandeurs dénommées* ***spécifiques****, ce qui exprime ici qu'elles sont rapportées à l'****unité de masse d'air sec****, seront représentées par un $s$ en exposant ($r^s$, $V^s$, ...).*

| ***Symbole*** | ***Unités*** | ***Définition*** |
|---|---|---|
| $H$ | $kJ/kg$ | *Enthalpie* |
| $M$ | $kg/s$ | *Débit-masse* |
| $Q$ | $kJ$ | *Quantité de chaleur* |
| $T$ | $K$ | *Température absolue* |
| $V$ | $m^3$ | *Volume* |
| $W$ | | *Degré de saturation* |
| $c$ | $kJ/kg \cdot K$ | *Capacité thermique massique* |
| $m$ | $kg$ | *Masse* |
| $p$ | $Pa$ | *Pression* |
| $r^s$ | $\frac{kg\ d'eau}{kg\ d'airsec}$ | *humidité spécifique* |
| $s$ | | *Facteur de chaleur sensible* |
| $v$ | $m/s$ | *Vitesse de circulation de l'air* |
| $U$ | $W/(m^2.K)$ | *Coefficient de transmission surfacique* |
| $R$ | $m^2.K/W$ | *Résistance thermique* |
| *Lda* ($\lambda$) | $W/(m.K)$ | *Coefficient de conductivité thermique (coefficient Lambda)* |
| $A$ | $m^2$ | *Surface* |
| $l,\ L$ | $m$ | *Largeur, Longueur* |
| $T$ | $K$ | *Température* |
| $D$ | $W/K$ | *Coefficient de déperdition thermique (multiplié par le DeltaT intérieur/extérieur, il donnera les déperditions totales en W)* |
| $Q$ | $m^3/h$ | *Débit d'air entrant dans le local* |
| $a$ | $W/(m^2.K)$ | *Coefficient de référence* |

# Résumé

*Le confort thermique des locaux (maisons, bureaux, locaux commerciaux, serres agricoles ...) nécessite le respect strict des consignes de température et d'hygrométrie. Pour cela, la mise en place d'une installation d'humidification controlée est indispensable.*

*Le site d'Adrar est caractérisé par un climat sec et chaud au cours de l'année (un rayonnement de 6 $kW/m^2$ par jour, une température superieure à 50 $^\circ C$ et un taux d'humidité relative inferieure à 5%). L'équipement des locaux en général et les locaux en préfabriqué en particulier par un moyen d'humidification par pulvérisation d'eau permet d'atténuer la criticité de ces effets thermiques, d'améliorer l'état psychrométrique et d'assurer un taux de satisfaction des occupants.*

*A ce propos une compagne de mesures a été effectuée au sein de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien URER\MS d'Adrar au cours de la période chaude de l'été (mois de Juillet et mois d'Août) afin de tester les états psychrométriques avant et après humidification d'un local en préfabriqué équipé par un humidificateur de type « Saclar ». L'approche de modélisation effectuée dans ce mémoire à partir de la base de données fourni par l'URER\MS d'Adrar a permis de modéliser l'échange de chaleur et de masse du local humidifié et de détérminer l'état de confort du système.*

*L'étude a été faite sur les paramètres de température, d'humidité relative et de la charge thermique du local. Les résultats obtenus montrent que l'état de confort du local s'est nettement amélioré après humidification on a enregistré (48.08 $^\circ C$, 5.48%) avant humidification et (34.21 $^\circ C$, 43.78%) après humidification[16] mais il reste audessous des normes prescrites et cela est due à l'état du local (inertie faible, isolation...), la performance dégradée du système et des appreils de mesures et les erreurs probables de mesures.*

# Abstract

*Thermal comfort of premises (houses, offices, commercial, greenhouses . . . ) need strict observance of temperature and humidity fluctuations. for this, the introduction of an installation a controlled humidification is indispensable.*

*Adrar's area is characterized by a dry and hot climate during the year (a radiation of 6 $kW/m^2$ per day, temperature above 50 $^\circ C$ and rate of relative humidity lower than 5%).The equipment of the premises generally and premises precast especially by means of humidification with water spray helps mitigate the heating effects, improving psychrometric condition and to ensure a level of occupant satisfaction.*

*In this regard a companion of measures was performed within the Unit of Renewable Energy in Saharan Environment URER\MS Adrar during the hot summer period (July and August) to test the psychometric states before and after humidification of a local precast equipped with « Saclar »humidifier.The modeling approach performed in this work starting from the database provided by the URER\MS Adrar was used to model the exchange of heat and mass of local humidified and determine the state of comfort system.*

*The study was done on the temperature settings of relative humidity and thermal charger of local. The results obtained show that the state of room comfort has improved markedly after humidification was recorded (48.08 $^\circ C$, 5.48%) before humidification and (34.21 $^\circ C$, 43.78%) after humidification [16] but it remains below the prescribed norms and this is caused by the state of room (low inertia, isolation . . . ), and a worse system performance of devices and probable measurement error.*

# Introduction

L'exigence du confort thermique a conduit l'homme depuis des siècles à développer des techniques de conditionnement de l'air qui ont évolué des poêles en faïence et les poteries en argile poreuse caractérisé par des défaillances techniques et des faibles rendements au humidificateurs modernes utilisant les technologies récentes[1].
La possibilité de réguler l'air dans les zones désertiques (chaudes et sèches) permettrait de faciliter notablement le travail et la vie des hommes, la croissance normale des plantes et la conservation des produits.

Dans le cas des espaces clos et pour l'environnement dans lequel l'homme se trouve placé le plus fréquemment, le climat naturel est souvent chaud, à savoir que, plus la température augmente, l'humidité relative de l'air diminue. L'air devient relativement sec et celui-ci tend à se saturer en absorbant de l'humidité de tout ce qui est à sa portée, c'est-à-dire ce qui est dans la pièce : les murs, les tentures, les meuble et naturellement aussi l'homme. Ce qui cause pour l'homme des phénomènes telle l'irritation du nez, du coup de la peau et la sensation anormale de soif intense. Les matériaux qui séjournent dans cet atmosphère perdent leurs souplesse et deviennent plus fragile même leur éclats et leur résistance s'en trouvent affectés[1].

Un autre phénomène est engendré par l'air sec, c'est l'électricité statique qui n'est pas nuisible à la santé mais elle est désagréable et procure une certaine inquiétude ; elle se forme lorsqu'il ya des revêtements de sol en matière synthétique ou des tapis dans le local et les personnes qui y vivent se charge rapidement et en permanence d'électricité statique[2].

Le traitement de l'air favorise le maintien des conditions d'ambiance d'un local. Beaucoup de facteurs sont pris en compte tels que l'hygrométrie, la qualité de l'air et le niveau sonore. Il fait appel à de nombreuses technologies et requiert les connaissances de spécialités aussi différentes que la thermique, l'hydraulique, l'aéraulique, l'acoustique, la filtration, la chimie, l'informatique, l'automatique et la régulation.

A savoir que l'air est un mélange gazeux d'une rare complexité. Sa pression et sa température varient constamment en un même point, sa composition, subit des changements dans l'espace et dans le temps en fonction des corps qu'on y rejette ou qu'on y prélève. Pesant et soumis aux lois de la thermodynamique, sa pression et sa température varient fortement avec l'altitude[3]. L'air est composé de [2] :

- Azote : 77,89% en volume ;
- Oxygène : 20,7 à 20,95% en volume ;
- Argon : 0,94% en volume ;
- Dioxyde d carbone : 0,03% en volume ;

- Hydrogène : 0,01% en volume ;

Il contient en outre de petites quantités d'autres gaz, comme par exemple l'Hélium, le Néon, le Crypton, le Xénon. Cette composition se rapporte à l'air sec. Mais il faut encore ajouter un autre composant très important pour les considérations qui entrent dans le cadre du conditionnement de l'air : c'est la vapeur d'eau. L'air qui est mélangé à la vapeur d'eau est appelé air humide.

L'humidité est une grandeur variable, dont l'influence est importante sur un certain nombre de processus physico-chimiques ou biologiques. Notre problème est de limiter les dommages résultant d'une insuffisance d'humidité de l'air, et dans une grande mesure de les éviter.

Les systèmes à pulvérisation correctement dimensionnés sont capables de moduler à la fois la pression de l'air injecté et la pression du mélange eau-vapeur du local. Le système doit combattre les charges du local et surtout celles relatives à l'air neuf. Un système d'humidification est conçu et expérimenté au sein de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar l'URER\MS durant la période chaude d'été (Juillet-Aout). Le système porte sur l'humidification d'un local en préfabriqué et ainsi voir l'évolution de son état psychrométrique avant et après humidification[16].

Lors de cette étude, nous avons présenté un modèle de bilan énergétique simple, représentant le comportement thermique d'un local en se basant sur un ensemble d'équations théoriques intégrant les processus d'échanges thermiques entre les différentes composantes du local. Vu que le modèle estime les charges thermiques du local, il pourra donc contribuer dans le choix et le dimensionnement des systèmes de refroidissement des locaux ainsi qu'aux serres agricoles.

Ce mémoire a pour but de faire le point sur le conditionnement de l'air dans le milieu saharien par pulvérisation d'eau et létude des charges et du confort thermique dans un local. Dans ce fait, notre travail se scinde en deux parties :

Une partie théorique qui comprend deux chapitres :

Le premier chapitre est une introduction à l'humidification de l'air et ses caractéristiques, la notion du confort thermique et les charges thermiques des locaux.

Le deuxième chapitre décrit l'humidification de l'air par pulvérisation d'eau, les grandeurs d'état de l'air atmosphérique et les diagrammes de l'air humide, ou diagrammes psychrographiques généralement mis à la disposition des ingénerie et l'hygrométrie (psychrométrie) de l'air.

Une partie pratique qui comprend un chapitre :

Le troisième chapitre consiste à étudier l'état psychrométrique du local avant et après humidification, et voir l'évolution du confort thermique des personnes en utilisant un programme de calcul sur MatLab. il est cloturé par une analyse et une discussion des résultats.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherches envisagées.

# Première partie

# Partie théorique

# Chapitre I

# Introduction au Conditionnement de l'air

## I.1 Conditionnement de l'air

Le conditionnement de l'air d'un local consiste à préparer et introduire de façon continue dans le local une certaine quantité d'air dont les caractéristiques sont telles que les conditions d'ambiance du local sont réalisées, vu que le conditionnement d'air du local diffère suivant l'utilisation du local, habitation, confort, industrie, locaux spécifiques (studio d'enregistrement, auditorium, théâtre...). Ces conditions portent sur : [4]

- la température de l'air
- son humidité.
- son renouvellement
- sa pureté

### I.1.1 L'objectif du conditionnement de l'air

L'objectif est de réaliser un microclimat intérieur confortable quelles que soient les conditions météorologiques extérieures et les apports de chaleur internes au local. Ces conditions météorologiques et ces apports internes définissent les charges que doit équilibrer le système de climatisation. Suivant la période pour laquelle est conçu ce système, on parle de climatisation d'hiver, d'été ou annuelle [4].

### I.1.2 La nécessité du conditionnement de l'air

Le conditionnement d'air s'avére nécessaire pour les locaux soumis à de fortes variations des charges qui peuvent être dues à

- des conditions climatiques sévéres (chaud et sec, climats chauds et humides en particulier)
- des apports de chaleur interne importants et variables dans le temps (salles de spectacle par exemple)
- La conception architecturale (nombreuses baies vitrées au sud, utilisation de matériaux de construction très légers conduisant à une très faible inertie de la construction)

### I.1.3 Les raisons pour conditionner/humidifier l'air

#### I.1.3.1 Coté économie :

Contrôler les conditions physiques de l'air, et en particulier l'humidité, peut générer d'intéressantes économies, soit par l'augmentation de la productivité du personnel, soit par la diminution du taux de produits rejetés [7].

#### I.1.3.2 Réalisation d'un environnement agréable

La sécheresse prolongée de l'air provoque des effets secondaires très génants pour celui qui y est exposé : irritation des muqueuses, sécheresse de la peau, gêne respiratoire... [7].

#### I.1.3.3 Elimination des décharges électrostatiques

Un air trop sec engendre la formation de charges électrostatiques toujours désagréables et parfois dangereuses (incendie). A environ 20% d'humidité relative, l'air est capable de retenir une charge statique de 35.000 volts. A environ 70%, cette charge n'est plus que de 1.500 volts [7].

#### I.1.3.4 Eviter le séchage de stock ou matériel entreposé

- La constance de l'humidité dans les imprimeries et usines de papier est un prérequis pour une production de qualité.
- Certaines productions à base de bois requiérent une humidité stable (tenue du bois ou accrochage de la peinture).
- Les fibres textiles sont plus cassantes dans un environnement trop sec.
- Les œuvres artistiques telles que des toiles se conservent beaucoup mieux dans un environnement contrôlé
- Le stockage des légumes en chambre froide demande une certaine constance de l'humidité si l'on désire minimiser les pertes.
- De nombreuses cultures en serres demandent un refroidissement et une humidification importants [7].

#### I.1.3.5 Refroidissement de l'air

Une température agréable est un facteur déterminant dans la qualité de l'environnement du travail. Dans de nombreux processus industriels, des températures difficilement supportables sont atteintes. L'évaporation dans l'air d'eau pulvérisée permet à la fois l'humidification et le refroidissement de celui-ci [7].

### I.1.4 Critères de décision pour humidifier l'air

Nous mentionnons les taux d'humidité valables en règle générale pour l'habitat

Table *I.1 – Critères de décision pour humidifier l'air*

| | Humidification | | | |
|---|---|---|---|---|
| Habitat | Déconseillée | pas nécessaire | conseillé | nécessaire |
| 0 à 25 % air très sec | | | | X |
| 25 à 35 % air sec | | | X | |
| 35 à 50 % conditions normales | | X | | |
| 50 à 65 % air humide | | X | | |
| 65 à 100 % air très humide | X | | | |

## I.1.5 Conditions d'ambiance pour le conditionnement de l'air

### I.1.5.1 Température intérieure $T_i$

Elle doit être inférieure ou égale à 19 ° C en hiver quelle que soit la température extérieure $T_{ext}$. En été, il est conseillé de respecter l'inégalité [8] :

$$T_{ext} - T_{int} \leqslant 16^{\circ} \tag{I.1}$$

De plus, pour évite des écarts importants de température de l'air dans le local climatisé, il est recommandé de limiter l'écart de soufflage (écart de température entre l'air soufflé $T_s$ et l'air intérieur $T_i$) aux valeurs suivantes [8] :

- $T_s - T_i < 16K$ en hiver
- $T_s - T_i < 8K$ en été (ces valeurs pouvant être majorées si l'air est diffusé dans la pièce sur de grandes surfaces ; exemple : plafonds diffusants)

### I.1.5.2 Humidité intérieure

Les critères de confort conduisent à retenir une humidité relative intérieure $y_{int}$ dans l'intervalle suivant [6] : $40\% < y_{int} < 60\%$.

### I.1.5.3 Renouvellement d'air neuf

Le débit de renouvellement d'air neuf dépend du type de local [8].

Table *I.2 – Exemple de débits de renouvellement d'air par type de local*

| | |
|---|---|
| 4 l/s/pers | Ecoles |
| 5 l/s/pers | habitations, bureaux, salles de conférence (avec interdiction de fumer) |
| 7 l/s/pers | bureaux (avec permission de fumer), ateliers avec travail sédentaire |
| 8 l/s/pers | salles de conférence (avec permission de fumer) |
| 10 l/s/pers | ateliers avec travail non sédentaire |
| 10 l/s/pers | salles de bain |

#### I.1.5.4 Débit d'air soufflé

Pour éviter des turbulences désagréables dans le local, il faut limiter ce débit en I.2 fonction du volume de ce local. On définit à cet effet le taux de brassage $[b < 10\ vol.h^{(-1)}]$ tel que [6] :

$$b = \frac{débit\ d'air\ soufflé\ (m.h)}{volume\ du\ local(m)} \tag{I.2}$$

## I.2 Composition d'un système de conditionnement de l'air

Un système de conditionnement de l'air est généralement composé de trois éléments [10] :

1. la centrale de traitement d'air traite l'air du point de vue thermique, de la qualité et met l'air en mouvement. Elle se compose généralement de :

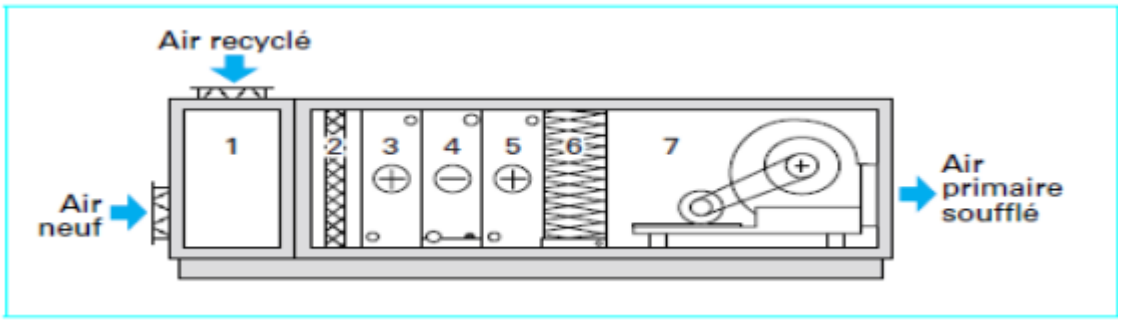


FIGURE *I.1 – Exemple de composition d'une centrale de traitement de l'air [10]*

- Un caisson de mélange (1)
- Un caisson de filtration (2)
- une batterie chaude (préchauffage) (3)
- une batterie froide (4)
- Le caisson de bipasse (5)
- Un humidificateur (6)
- Un ventilateur (7)

2. la régulation agit sur différents paramètres pour maintenir les valeurs mesurées proches du confort désiré ;
3. le réseau aéraulique assure les liaisons entre la centrale de traitement d'air et les locaux desservis. Il sert également, en liaison avec l'extérieur, à l'introduction et à l'extraction d'air.

## I.3 Grandeurs caractéristiques d'un système de conditionnement d'air [3],[4]

### I.3.1 Les conditions de base extérieures

Elles constituent des données fondamentales pour l'évaluation des puissances nécessaire au traitement de l'air neuf. Elles sont utiles pour le calcul des charges des locaux climatisés [8].

#### I.3.1.1 Les conditions de base hivernales

La température extérieure de base correspond à la température minimale quotidienne constatée au moins 5 fois au cours de l'année [8].

#### I.3.1.2 Les conditions de base estivales

Elles découlent d'une analyse statistique des données climatiques et d'un facteur de risque raisonnable pour l'installation considérée. Ces conditions ne sont pas les conditions maximales pouvant être rencontrées [8].

### I.3.2 Les conditions de base intérieures

les conditions de bases intérieures qui influent sur le confort thermique sont comme suit [6] :

#### I.3.2.1 Le confort thermique

Le confort est un concept essentiellement subjective qu'il est difficile de caractériser de façon rigoureuse. Toutefois, des travaux de recherche récente auprés d'un large publique ont permis de mettre en évidence les facteurs principaux :

- Le climat thermique
- La qualité de l'air
- Le niveau acoustique
- L'éclairage

#### I.3.2.2 Echanges thermiques entre le corps humain et son environnement

L'homme maintient sa température interne à environ 37 ° C dans différentes ambiance grâce à un mécanisme thermique qu'il dispose. Pour réaliser cet équilibre thermique le corps humain produit de la chaleur par conversion d'énergie chimique, appelé métabolisme, et d'autre part côde de la même quantité de chaleur à son environnement.
Le mécanisme d'échange thermique utilise tous les moyens de transmission de chaleur.

**Convection** l'air au voisinage de la peau ou du vêtement s'échauffe et emporte de la chaleur. La convection est naturelle si le mouvement de l'air n'est dû qu'à son échauffement. Au contraire si l'air est pulsé ou si la personne déplace, la convection est forcée. Loi de Newton

$$Q = h_c.A(T_s - T_\infty) \tag{I.3}$$

Avec
- $Q$ : Flux de chaleur ;
- $h_c$ : Coefficient d'échange convectif ($Wm^{(-2)}k^{(-1)}$)
- $T_s$ : Température de la surface ; $T_\infty$ température du fluide ;

**Rayonnement** le corps humain émet de la chaleur par rayonnement vers les surfaces qui l'entourent. Ce flux thermique peut s'inverser si les parois ont une température supérieure à la température superficielle de la peau ou du vêtement.

**Evaporation** le phénomène de transpiration est le moyen le plus efficace de refroidissement du corps humain. Au niveau de la peau la sueur s'évapore, évacue donc de la chaleur latente et humidifie l'air ambiant (à condition qu'il ne soit pas saturé). Même si l'on n'a pas la sensation

de transpirer, le corps perd toujours un peu d'humidité (transpiration insensible). Respiration le corps perd de la chaleur par expiration parce que l'air expiré est plus chaud et plus humide que l'air aspiré. Le corps humain perd de la chaleur par expiration (renouvèlement d'air).

$$L_v = 4180(883 - 0.668.T_W) \tag{I.4}$$

$L_v$ Chaleur latente d'évaporation $[Wh/kg]$

#### I.3.2.3 Equation du confort thermique

On admet que la première condition à réaliser pour atteindre le confort thermique consiste à équilibrer le bilan énergétique du corps humain. Il perd alors exactement la chaleur produite par métabolisme. L'équation qui exprime cette égalité est assez difficile du fait de la multiplicité et la complexité des échanges [8].

$$\begin{aligned}(M - W) = {} & 3,05.10^{(-3)}.[5733 - 6,99.(M - W) - p_v] + 0,42.[(M - W) - 58,15] \\ & + 1,7.10^{(-5)}(5867 - p_v) + 0,0014.M.(34 - T_a) \\ & + 3,96.10^{(-8)}.f_v.[(T_{sv} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4] + f_v.h_c.(T_{sv} - T_a)\end{aligned} \tag{I.5}$$

Avec

a. $M$ : Métabolisme total $[W/m^2]$

b. $W$ : Travail extérieur très souvent négligeable $[W/m^2]$

c. $p_v$ : Pression partiel de vapeur de l'air ambiant $[Pa]$

d. $T_a$ : Température de l'air ambiant [ ° C]

e. $T_{rm}$ : Température radiante moyenne des parois [ ° C]

f. $T_{sv}$ : Température superficielle moyenne de vêtement [ ° C]

$$\begin{aligned}T_{sv} = {} & 35,7 - 0,028.(M - W) - 0,155.I_v.[(M - W) - 3,05.10^{(-3)} \\ & .(5733 - 6,99.(M - W) - p_v) - 0,42.((M - W) - 58.15) - 1,7.10^{(-5)} \\ & .M.(5867 - p_v) - 0,0014.M.(34 - T_a)]\end{aligned} \tag{I.6}$$

g. $h_c$ Coefficient d'échange par convection $[W/m^2.K]$

$$h_c = sup[2,38.(T_{sv} - T_a)^{0.25}.12,1.\sqrt{V}] \tag{I.7}$$

Avec $V$ vitesse relative de l'air $[m/s]$
$f_v$ Facteur de vêtement (représente le rapport de la surface du corps habillé à la surface du corps nu) $[clo]$
$f_v = 1,00 + 0,2.I_v \ Pour \ I_v < 0,5$
$f_v = 1,05 + 0,1.I_v \ Pour \ I_v > 0,5$

#### I.3.2.4 Les facteurs qui influencent le confort thermique

**L'activité physique des occupants** Elle conditionne directement le métabolisme

**L'habillement des personnes** Il est lié à la température extérieure et à la nature du local, il influence les échanges thermiques [8]

a. par convection entre le corps et l'afmbiance ;

b. et par rayonnement entre le corps et les parois environnantes.

Il se mesure en [1clo= résistance thermique de 0,155$[m^2.K/W]$] (venant de « clothing », anglais)

**Température de l'air ambiant** $T_a$ La température de l'air est fondamentale car c'est la grandeur sur laquelle agit le système chargé d'assurer le confort thermique.

**Température radiante des parois** La température radiante moyenne $T_{rm}$ est la moyenne des températures de surface des parois pondérée par l'importance relative de chaque paroi (par l'angle solide formé par la paroi observée du point d'occupant).

$$T_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ts_i \Omega_i}{4\pi} \tag{I.8}$$

- $T_{rm}$ température radiante moyenne du point d'occupant
- $Ts_i$ température superficielle de chaque paroi
- $\Omega_i$ angle solide formé par chaque paroi, vu du point de vu de l'occupation en stéradians $[sr]$.

**Température résultante sèche** La température résultante sèche ou température opérative, $T_{rs}$, exprime les échanges par convection et par rayonnement, elle a une valeur intermédiaire entre la température de l'air et la température radiante moyenne des parois.

#### I.3.2.5 Indice du confort thermique

Les spécialistes ont tenté de cerner par une seule formule toutes les grandeurs qui influencent la sensation de confort thermique comme la température ambiante, la température des parois, l'humidité ambiante, les mouvements d'air, l'activité et l'habillement. C'est à partir de l'équation du confort thermique que l'on peut calculer le pourcentage prévisible d'insatisfaits noté *PPD*.
L'indice PMV ('predicted mean Vote', vote moyen prévisible) PMV = 0 représente le confort optimal, c'est-à-dire que l'équation de confort thermique est réalisée (métabolisme = pertes de chaleur). L'échelle de sensation thermique est la suivante [3] :

Table *I.3 – Échelle de sensation thermique*

| **PMV** | -3 | -2 | -1 | -0,5 | 0 | +0,5 | +1 | +2 | +3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sensation** | froid | frais | légèrement frais | - | neutre | - | légèrement chaud | tiède | chaud |
| *PPD* | 90% | 75% | 25% | 10% | 5% | 10% | 25% | 75% | 90% |

$$\begin{aligned} PMV = {} & (0,303.e^{(-0,036.M)} + 0,028)[(M-W) - 3,05.10^{(-3)}.(5733 - 6.99.(M-W) - p_v) \\ & - 0,42.((M-W) - 58,15) - 1,7.10^{(-5)}.M.(5867 - p_v) - 0,0014.M.(34 - T_a) \\ & - 3,96.10^{(-8)}.f_v.((T_{sv}+273)^4 - (T_{rm}+273)^4) - f_v.h_c.(T_{sv} - T_a)] \end{aligned} \tag{I.9}$$

Avec

$$\begin{aligned} T_{sv} = {} & 35,7 - 0,028.(M-W) - 0,155.I_v.[3,96.10^{(-8)}.f_v.((T_{sv}+273)^4 \\ & - (T_{rm}+273)^4) - f_v.h_c.(T_{sv} - T_a)] \end{aligned} \tag{I.10}$$

*PPD* : « Predicted percentage of dissatisfied » pourcentage prévisible d'insatisfaits calcule ainsi :

$$PPD = 100 - 95.exp^{(-0,03353.PMV^4 - 0,2179.PMV^2)} \tag{I.11}$$

## I.4 Les charges d'un local

Le local possède deux types de charges : charges thermiques et hydriques [5].

### I.4.1 Charges thermiques

Apports ou dèperditions de chaleur externes et internes en $[kW]$. Elles reprèsentent la quantitè de chaleur sous forme sensible apportèe ou perdue par le local. Elle est notèe $Q_s$ et exprimèe en $kW$ [2].

#### I.4.1.1 Charges sensibles externes

- Apports (été) : Charges estivales essentiellement par ensoleillement et par conduction, convection, rayonnement. Les charges thermiques ou sensibles des locaux sont positives par ensoleillement, par transmission à travers les parois du local. Le flux solaire direct et indirect (diffus) apporte au local la majeure partie de ces charges.
- Déperditions thermiques (hiver) : Charges hivernales par conduction, convection, infiltration d'air extérieur. Les charges thermiques des locaux sont en général négatives par transmission à travers les parois.

Le signe de $Q_s$ dépend du type de charge : + pour des apports ou - pour des déperditions [2].

#### I.4.1.2 Charges sensibles internes

Ce sont les apports de chaleur sous forme sensible pouvant provenir de machines électriques, de l'éclairage, des tuyauteries et conduits (souvent négligé), des occupants, des processus industriels [2].

### I.4.2 Charges hydriques

Apports internes d'humidité en $[kW]$ ou $kg_{eau}/h]$. Ce sont les apports de chaleur sous forme latente (dégagement d'humidité sous forme de vapeur d'eau). Ces dégagements d'humidité sont dus aux occupants, au processus industriel, au type de local (à fort dégagement d'humidité : piscine par exemple). Ces apports peuvent être exprimés de deux façons [2] :

- Masse d'eau ou d'humidité : $M$ en $[kg_{eau}/h]$
- Puissance : $Q_L$ en $[kW]$

Il existe une relation liant $M$ et $Q_L$ : $Q_L = M.L_V$ Avec

- $L_V$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température intérieure du local en $[kJ/kg_{eau}]$,
- $M$ en $[kg/s]$,
- $Q_L$ en $[kW]$.

### I.4.3 Charges totales ou enthalpiques

C'est la somme algébrique des charges sensibles et des charges latentes [2] :

$$Q_T = Q_S + Q_L \tag{I.12}$$

Une attention particulière doit être apportèe au calcul de $Q_T$ :

- $Q_S$ peut être négatif ou positif (déperdition ou apport de chaleur)
- $Q_L$ est souvent positif (apport d'humidité)

Dans certains cas, on peut avoir $\mid Q_T \mid < \mid Q_S \mid$ (en hiver, par exemple) $\mid \mid$ (valeur absolue)

### I.4.4 Les différents apports de chaleur

- Un apport de chaleur sensible par rayonnement résultant du flux solaire radiatif qui traverse la paroi vitrée ;
- Un apport de chaleur sensible par conduction résultant du flux calorifique qui traverse la paroi vitrée de l'extérieur vers l'intérieur ;
- Un apport de chaleur sensible par conduction résultant du flux calorifique qui traverse le mur en bâton de l'intérieur vers l'extérieur ;
- Un apport de chaleur sensible par convection et rayonnement dû à l'activité des personnes se trouvant dans le local ;
- Un apport de chaleur latente par évaporation résultant de l'activité des personnes se trouvant dans le local [2].

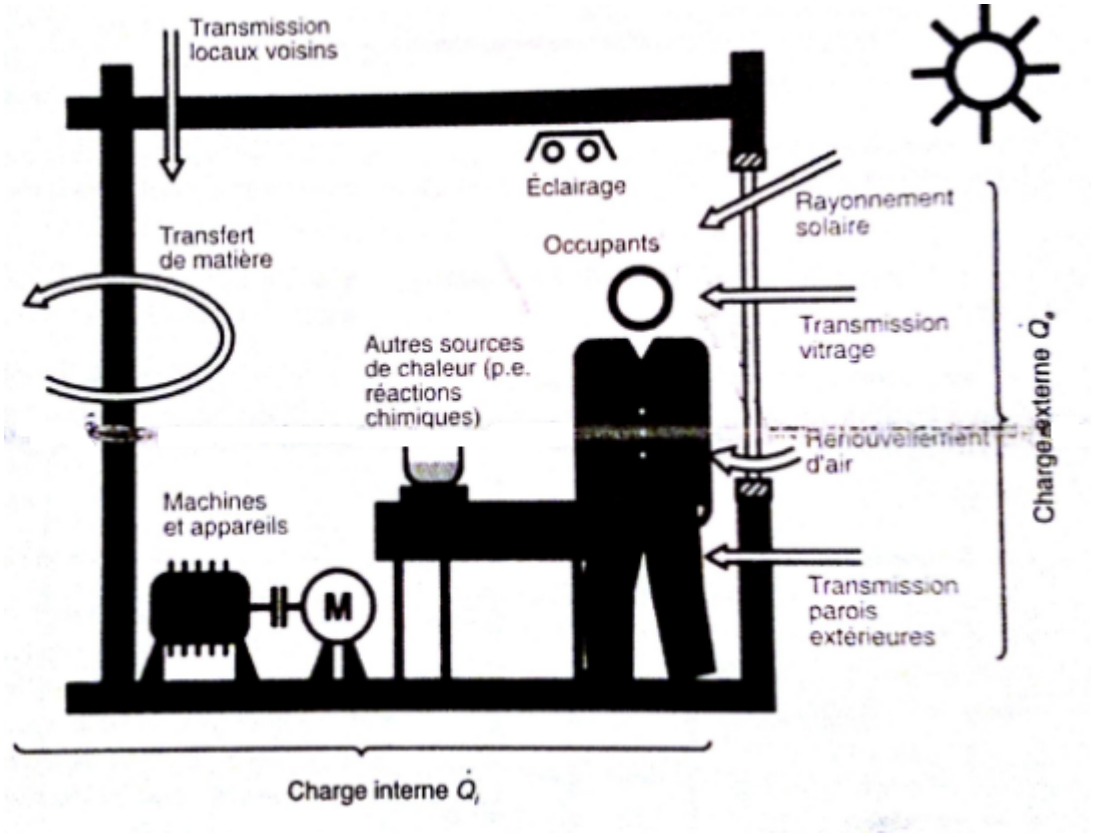


FIGURE *I.2 – Résumé de l'origine des différentes charges à prendre en compte dans le calcul d'une installation de conditionnement de l'air [2]*

## I.5 Le calcul des charges

Le calcul des charges dans une installation de conditionnement d'air consiste à déterminer poste par poste les quantités de chaleurs qu'il faut soustraire d'un local donné en vue d'y maintenir une certaine température ambiante [5].

### I.5.1 Importance de l'appréciation des charges

Lorsque le résultat d'un calcul de charges de conditionnement d'air n'est pas exact, il est alors soit sous-estimé soit surestimé. La sous-estimation et la surestimation peut également provenir non d'un calcul erroné en lui-même mais de bases de calcul incorrectes qui peut être le cas par exemple d'un mauvais choix de conditions de base tant extérieurs qu'intérieurs [5].

**Sous-estimation :** La principale conséquence, dans le cas où les charges sont sous-estimées est que l'installation de conditionnement d'air ne va pas être capable d'assurer les conditions de température ambiante requises.

**Surestimation :** Pour le cas de la surestimation des calculs, les inconvénients sont nombreux :

- Mise en concurrence : pertes du marché, les concurrents proposent les matériels moins puissants donc moins chers bien que capables de répondre aux exigences souhaitées ;
- Le client : cela se traduit par un investissement plus important que nécessaire et des frais d'exploitation inutilement supérieurs à ce qu'ils devraient être.
- ... etc.

### I.5.2 Les différentes méthodes de calcul des charges

La méthode de calcul des charges à adopter dépend de la complexité de la situation : nombre des apports de chaleur, les orientations du local ...
Dans un cas simple nous pouvons utiliser une méthode de calcul manuelle tandis que pour les cas complexes ou litigieux nous adopterons un calcul automatique au moyen d'un programme informatique dénommés programme de calcul dynamique. Ces programmes permettent d'intégrer un très grand nombre de paramètres permettant d'effectuer rapidement de nombreuses simulations. Il existe de nombreuses méthodes de calcul des charges mais il est meilleur si on se remet à une méthode non seulement fiable mais également précise avec laquelle on pourra calculer les charges aussi bien d'une petite installation que d'une grande installation de conditionnement de l'air [5].

# Chapitre II

# Humidification par pulvérisation d'eau

## II.1 Humidification de l'air

Deux procédés différents existent et peuvent être mis en place pour augmenter le degré d'humidité de l'air :

- L'humidification isotherme
- L'humidification adiabatique

### II.1.1 Humidification isothermique

Le processus d'humidification isothermique consiste en l'introduction dans un environnement de vapeur d'eau générée par ébullition (l'eau est portée jusqu'à ébullition pour être dispersée dans l'air). Ce processus nécessite qu'une source externe apporte l'énergie nécessaire au changement d'état de l'eau cependant comme la masse de la vapeur est inférieure à celle de l'air, la température de l'air reste stable. Les humidificateurs à vapeur garantissent une sûreté hygiénique, la vaporisation évite le développement de micro-organismes potentiellement dangereux [11][12].

### II.1.2 Humidification adiabatique

Le processus d'humidification adiabatique consiste en l'évaporation directe de l'eau dans l'air sans apport d'énergie extérieure : l'eau est finement pulvérisée pour maximiser la superficie de contact avec l'air et est absorbée. L'air, qui cède sa chaleur lors de la transformation de l'eau en vapeur, diminue sa température. La chaleur nécessaire à l'évaporation n'est pas fournie par une source externe mais par l'air. La consommation électrique des humidificateurs adiabatiques est très limitée [11][12].

### II.1.3 Technologies d'humidification de l'air

Les procédures de l'humidification se scindent en différentes technologies dont le choix dépend du type d'utilisation du local [9] :

#### II.1.3.1 Les systèmes à vapeur

consomment d'importantes quantités d'énergie électrique. De plus, un tel processus d'humidification provoque une augmentation de la température de l'air pas toujours désirable.

#### II.1.3.2 Les systèmes type « laveur »

ont comme principe de faire passer l'air à travers un rideau d'eau. L'air se charge d'humidité et se refroidit. L'énorme désavantage de ces systèmes est qu'il faut recycler l'eau de nombreuses fois. Dans ce processus il est difficile et coûteux de combattre la prolifération bactérienne, source de maladies pour les occupants du bâtiment.

#### II.1.3.3 Les systèmes à pulvérisation fine

En pulvérisant un fin brouillard d'eau, ceci permet à l'air d'absorber l'intégralité de celui-ci. Le recyclage de l'eau n'est pas nécessaire. L'élimination des problèmes liés à la prolifération bactérienne est dés lors assurée ; tout surplus d'eau est systèmatiquement évacué.

TABLE *II.1 – Différents types d'humidificateur*

| Types d'humidificateur | Fonctionnement | Sous-types |
|---|---|---|
| **Humidificateurs adiabatiques** | Ils utilisent de l'eau qui est ensuite la chaleur nécessaire est fournie par l'air évaporée : qui se refroidit et, parallèlement, se charge en vapeur d'eau. La transformation est adiabatique : il n'y a pas augmentation de l'enthalpie (chaleur totale) mais une modification du rapport chaleur sensible/chaleur latente apparaît. | • Humidificateur à pulvérisation avec recyclage par pompe<br>• Humidificateur à pulvérisation à eau perdue<br>• Humidificateur à ruissellement avec recyclage par pompe<br>• Humidificateur à ruissellement à eau perdue |
| **Humidificateurs à vapeur** | Ils utilisent directement la vapeur d'eau produite par un générateur centralisé (chaudière, sous-station d'un réseau de chauffage) ou par un système autonome intégré. | • Humidificateur à vaporisation par générateur centralisé<br>• Humidificateur à vaporisation par ébullition |

### II.1.4 L'humidificateur par pulvérisation d'eau

Dans les systèmes à pulvérisation, de l'eau est atomisée à l'aide d'air comprimé pour former un flux de particules d'eau microscopiques ayant l'aspect d'un brouillard. Les particules d'eau passent rapidement de la phase liquide à la phase gazeuse en absorbant l'énergie de l'air ambiant ou du jet d'air. Les systèmes à pulvérisation n'apportent pratiquement aucune part de l'énergie de vaporisation nécessaire pour amener le taux humidité relative (HR) à la valeur souhaitée. C'est pour cette raison que les systèmes à pulvérisation sont des processus à enthalpie pratiquement constante. La température sèche diminue au fur et à mesure de l'augmentation du taux HR. Avant d'utiliser un système à pulvérisation, une analyse de l'eau est conseillée si de l'eau à osmose inverse ou dé-ionisée n'est pas disponible [9].

#### II.1.4.1 Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau

Un humidificateur à pulvérisation d'eau froide peut être utilisé :

- soit pour l'humidification directe des grands locaux (halls de fabrication, ateliers, ...),
- soit comme un des éléments insérés dans une centrale de traitement d'air.

Le principe commun à tous les systèmes à pulvérisation est de créer un fin brouillard par des microgouttelettes d'eau froide en suspension. Le mélange eau - air doit être intime afin que l'évaporation de l'eau puisse se faire le plus rapidement possible.

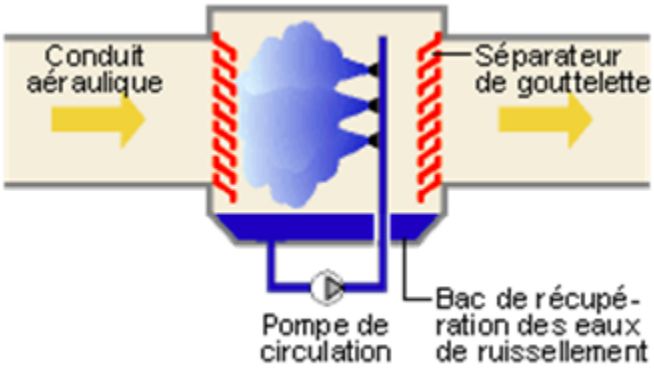


FIGURE *II.1 – Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau [9]*

#### II.1.4.2 Technologie des appareils à pulvérisation

Humidificateurs par « brumisation ». Sous cette appellation sont regroupés tous les systèmes d'humidification qui utilisent la pulvérisation d'eau ; humidificateurs centrifuges, humidificateurs laveurs, humidificateurs rotatifs, humidificateurs à ultrasons, humidificateurs à buses hydrauliques ou à buses bi-fluides (eau+air) [9].

1. **Humidificateurs centrifuges :**
   Un plateau équipé sur sa périphérie de dents est mis en rotation par un moteur. L'eau arrive sur ce plateau et par centrifugation est projetée sur les dents qui la brise en fines gouttelettes. Le débit unitaire de chaque appareil est limité et les sels dissous dans l'eau sont souvent entraînés dans l'air et viennent se déposer sous forme de poudre sur toutes les surfaces. Les appareils munis d'une réserve d'eau doivent être fréquemment nettoyés afin d'éviter la formation d'algues et la création d'un bouillon de culture pour les bactéries.

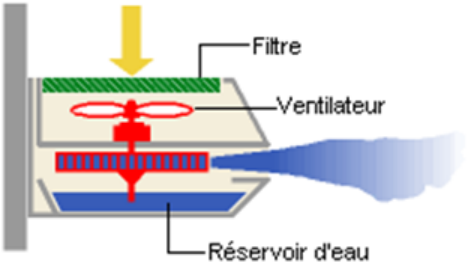


FIGURE *II.2 – Humidificateurs centrifuges [9]*

2. **Humidificateurs laveurs :**
   Ils sont généralement montés dans les centrales de traiteme nt d'air dans un caisson indépendant. Des rampes équipées de buses de pulvérisation humidifient et lavent l'air traversant. Un séparateur de gouttelettes est monté en sortie afin d'éviter l'entrainement des gouttelettes les plus grossières. Le rendement de ces humidificateurs dépend de la qualité des buses utilisées, du dimensionnement du caisson (vitesse de l'air) et de la direction de la pulvérisation (Co-courant ou contre courant). Le bac de rétention demande un entretien soigné si l'on souhaite éviter la prolifération de moisissures, champignons et germes. Les coéts d'entretien et de fonctionnement sont conséquents.

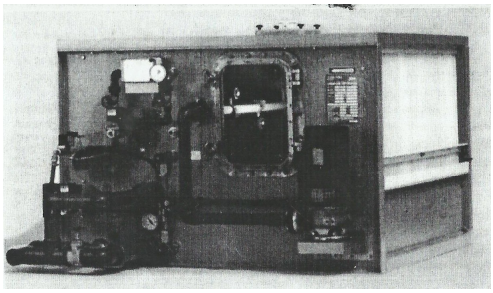

FIGURE *II.3 – humidificateur-laveur [9]*

3. **Humidificateurs rotatifs :**
   Ils sont également prévus pour être installés dans des centrales de traitement d'air. Ces humidificateurs de conception récente, utilisent une buse rotative entraînée par un moteur à plus de 10000 rpm. L'alimentation de l'eau se fait par le centre de la buse et sous l'effet de la rotation, la veine d'eau est projetée par des orifices sur un tamis circulaire qui l'éclate en fines gouttelettes. Ces appareils doivent être placés dans l'axe du caisson. L'entretien est limité à la vérification de l'état de la buse et du tamis protecteur. La consommation électrique n'est négligeable mais les couts d'entretien restent limités.
4. **Humidificateurs à ultrasons :**
   Ils se composent pour l'essentiel d'un convertisseur pièzo-électrique qui transforme un signal électrique en une oscillation mécanique de haute fréquence (1,65MHz). Appelé aussi transducteur il est placé au fond d'un réservoir d'eau. L'inertie de l'eau ne pouvant suivre la fréquence de vibration du transducteur, il se produit un phénomène de cavitation qui engendre la formation de micro-bulles. Le débit de ces appareils est faible et leur emploi est pratiquement limité aux vitrines réfrigérées. L'eau d'alimentation doit être de très bonne qualité et si possible déminéralisée.

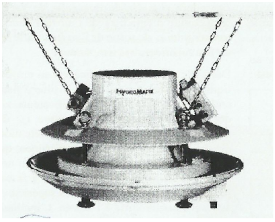

FIGURE *II.4 – Humidificateurs à ultrasons [9]*

5. **Humidificateurs à buses hydrauliques :**
   Ils comprennent une pompe haute pression (50 à 100 bar) et des rampes fixes sur les quelles sont installés des atomiseurs hydrauliques. Les orifices des atomiseurs hydrauliques sont de faible section et de ce fait la filtration doit être parfaite car les risques de bouchage sont importants. L'eau d'alimentation doit également être de bonne qualité si l'on veut limiter les interventions. Ces systèmes nécessitent une certaine vitesse d'air et sont généralement utilisés pour la climatisation extérieure dans les pays chauds, l'humidification en serres, ou le refroidissement des bâtiments d'élevage.

6. **Humidificateurs à buses bi-fluides :**
   Comme leur nom l'indique les buses d'atomisation utilisent deux fluides, l'eau et l'air comprimé. L'air comprimé permet de générer un brouillard très dense de fines gouttelettes. Les pressions d'eau et d'air réglables par une armoire de contrôle permettent d'ajuster la finesse du brouillard. Bien que les atomiseurs pneumatiques soient équipés d'une aiguille de débouchage, l'eau doit être parfaitement filtrée et de sa qualité va dépendre la fréquence des interventions. Ils sont faciles à mettre en œuvre, les coôts de fonctionnement sont faibles mais la consommation d'air n'est pas négligeable. Ils peuvent être installés soit dans des caissons de conditionnement d'air ou bien directement dans les locaux à traiter. L'absence de réserve d'eau évite toute contamination de l'eau. Au montage des précautions doivent être prises pour que le brouillard d'eau émis par les atomiseurs ne rencontre pas des obstacles, ce qui provoquerait une condensation.

#### II.1.4.3 Les avantages et les inconvénients des humidificateurs par pulvérisation

##### II.1.4.3.1 Les avantages des humidificateurs par pulvérisation

D'une façon générale, les humidificateurs par pulvérisation [9] :

- Engendrent moins de pertes de charge que le laveur à ruissellement.
- Ne présentent pas l'inconvénient de l'encrassement de la surface de ruissellement.
- Les appareils à pulvérisation par centrifugation ou par buse rotative, permettent une régulation du débit d'eau sur hygrostat.
- Les appareils à pulvérisation directe dans un local sont de puissance électrique faible et de grande facilité d'installation.

##### II.1.4.3.2 Les inconvénients des humidificateurs par pulvérisation

Les humidificateurs par pulvérisation avec eau recyclée présentent les inconvénients hygiêniques liés à la stagnation de l'eau au fond du bac de ruissellement. Un entretien régulier est indispensable ce qui augmente les coûts d'exploitation. La consommation en eau liée à la déconcentration n'est pas négligeable [9].

## II.2 Grandeurs d'état de l'air humide importantes pour l'humidification de l'air

### II.2.1 Propriétés de l'air humide

a. **Masse de l'air humide**
La masse totale mah d'une certaine quantité de l'air humide est égale à la somme de masses de l'air sec $m_{as}$ et de la vapeur d'eau $m_{ve}$ [3]

$$m_{ah} = m_{as} + m_{ve} = (1 + x)m_{as} \tag{II.13}$$

b. **Masse volumique**
- La masse volumique $\rho$ de l'air humide est égale à la masse de l'air humide contenue dans une unité de volume d'air humide elle s'exprime en $[kg\ d'ah/m^3\ d'ah]$.

$$\rho = \frac{m_{ah}}{V_{ah}} = \frac{m_{as}}{V_{ah}} + \frac{m_{ve}}{V_{ah}} \tag{II.14}$$

- La masse volumique $\rho^*$ de l'air sec est égale à la masse de l'air sec contenue dans une unité de volume d'air humide, elle s'exprime en $[kg\ d'as/m^3\ d'ah]$ [3].

c. **Volume spécifique**
On préfère généralement rapporter le volume occupé par l'air humide à l'unité de masse d'air sec, d'où la définition du volume spécifique $V^s$ : volume d'air humide renfermant l'unité de masse d'air sec (spécifique signifiant ici rapport à l'unité de masse d'air sec) $[\frac{m^3}{kg\ d'air\ sec}]$ [7]

$$V^s = \frac{V}{m_a} = V^* \frac{(m_a + m_v)}{m_a} \tag{II.15}$$

- Le volume massique $v$ inverse de la masse volumique $\rho(v = \frac{1}{\rho})$ égal au volume de l'air humide contenant une unité de masse d'air humide, il s'exprime en $[m^3\ d'ah\ /\ kg\ d'ah]$.
- Le volume massique $\rho^*$ inverse de la masse volumique $\rho^*(\rho^* = \frac{1}{\rho^*})$ égal au volume de l'air humide contenant une unité de masse d'air sec, il s'exprime en $[m^3\ d'ah\ /\ kgd'ah]$.

d. **Le débit de masse d'air humide**
Le débit-masse d'air humide $\dot{m}_{ah}$ à partir d'un débit-volume d'air humide $\dot{V}_{ah}$ puisque l'on a [7] :

$$\dot{m}_{ah} = \dot{V}_{ah}.\rho = \frac{\dot{V}_{ah}}{v} \tag{II.16}$$

e. **Le débit-volume de l'air humide**
Le débit-volume d'air humide $\dot{V}_{ah}$ à partir d'un débit-masse d'air humide $\dot{m}_{ah}$ puisque l'on a [7] :

$$\dot{V}_{ah} = \dot{m}_{ah}.v = \frac{\dot{m}_{ah}}{\rho} \tag{II.17}$$

### II.2.2 Enthalpie

L'enthalpie est une fonction thermodynamique de la plus haute importance pour le calcul énergétique des équipements. Rappelons que seules ses variations sont calculables et qu'il convient donc de fixer, *conventionnellement*, une origine aux différentes enthalpies. L'enthalpie de l'air humide doit tenir compte de l'enthalpie de l'air sec et de l'enthalpie de l'eau qui l'accompagne.
On considère, pour les calculs d'équipements [11] :

- **l'enthalpie massique** $H*$ pour l'air sec, l'eau ou l'air humide ; elle est rapportée à l'unité de masse du corps considéré et on l'exprime en $J/kg$, ou plus souvent en $kJ/kg$ ; on la rencontre encore souvent exprimée en unités thermiques : $kcal/kg$ ;
- **l'enthalpie spécifique** $H_s$ pour l'air humide seulement ; elle est rapportée à l'unité de masse d'air sec ; on l'exprime en $J/kg$ d'air sec, ou en $kJ/kg$ d'air sec, mais aussi en $kcal/kg$ d'air sec

## II.2.3 Températures caractéristiques de l'air humide

### II.2.3.1 Température de bulbe sec

La température de bulbe sec ou, plus rapidement, température « sèche » est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, ledit thermomètre étant placé dans l'air en question. C'est la température au dsens habituel du terme [11].

### II.2.3.2 Température de rosée

La température jusqu'à laquelle il faut refroidir de l'air pour qu'il arrive à sa saturation. Si l'on refroidit, par un moyen quelconque, une surface S placée dans un air humide dont l'humidité spécifique est constante, on atteint une température pour laquelle la phase condensée, eau ou glace, apparaît sur la surface froide. Lorsque la surface est polie (miroir), cette phase apparaît très bien. La température $T_r$ est la température de rosée (ou de givre) de l'air humide. Si la température $T_S$ de la surface est telle que [11] :

- $T_S < T_r$ : il n'y a aucun dépôt de phase condensée ;
- $T_S \leqslant T_r$ : il y a condensation ou givrage sur la surface froide.

**Le point de rosée** Pour tout état d'air donné caractérisé par ses grandeurs d'état $T$, $Q$ , $\chi$, $P_{ve}$ et $P_{ah}$ correspond un point de rosée dont les grandeurs d'état sont les suivant :

- $\chi_r = \chi$
- $Q_r = 1$ *soit* 100%
- La pression pour une $T_r$ : $p_{ve,r} = p_{ve} = p_{ve,max}$
- température

$$T_r = 100.(\frac{p_{ve}}{288,68})^{\frac{1}{8,02}} - 109,8 \tag{II.18}$$

### II.2.3.3 Température de bulbe humide

C'est la température indiquée par un thermométre dont le bulbe thermique est recouvert d'une mince couche d'eau (au moyen, par exemple, d'une mèche textile entourant le bulbe et imbibée d'eau distillée). Pour que le thermomètre à bulbe humide ainsi constitué fournisse, approximativement, la température thermodynamique $T_h$ , il faut que la vitesse $V$ de circulation de l'air sur le bulbe soit suffisamment grande pour que les échanges de chaleur et de masse soient suffisamment intenses [11].

## II.2.4 La psychrométrie

La psychrométrie désigne les caractéristiques physiques et thermodynamiques d'un mélange gaz-vapeur. L'air humide étant un mélange gaz-vapeur, l'étude des ses caractéristiques est appelée « Psychrométrie ». Un des premiers appareils permettant de mesurer deux grandeurs fondamentales de l'air humide est le psychromètre [3][7].

### II.2.5 Le psychromètre

En effet, cet appareil, constitué de deux thermomètres, permet de mesurer :

- la température sèche de l'air (appelée aussi « de bulbe sec » par analogie au bulbe du thermomètre) qui définit le « degré d'agitation moléculaire de l'air ».
- la température humide de l'air (appelée aussi « de bulbe humide ») obtenue par la mesure, à l'aide d'un bout de tissu enveloppé sur l'élément de mesure (bulbe), imbibé d'eau et ventilé pour provoquer l'évaporation de cette eau. Cette température est par la nature même de l'échange thermodynamique eau/air (évaporation) inférieure à la température sèche de cet air.

Ces deux mesures permettent de définir de façon relativement précise les caractéristiques de l'air humide. Le diagramme représentant les caractéristiques de l'air humide (« Diagramme de l'air humide ») est donc naturellement appelé « Diagramme Psychrométrique »[3][7].

## II.3 Diagrammes de l'air humide

Dans les calculs sur l'air traité dans les installations de conditionnement de l'air on utilise quatre grandeurs d'état qui sont la pression p, la température t, l'humidité x, et l'enthalpie h dont la détermination par le calcul est fastidieuse puisque elle nécessite de résoudre divers équations c'est pourquoi différents diagrammes dits diagrammes de l'air humide ont été mis au point afin de trouver la valeur d'un paramètre par simple lecture dans un graphique. Ils définissent également en fonction de la température la quantité maximale de vapeur d'eau admissible au delà de laquelle l'équilibre diphasique air/vapeur d'eau est impossible. Il existe de nombreux diagrammes de l'air humide que l'on peut classer en deux grandes catégories en fonction de leur présentation [3][7] :

- **Les diagrammes de type « diagramme de Mollier » d'origine allemande :**
  $(r^s, H^s)$À axes obliques qui donne l'humidité spécifique en fonction de l'enthalpie spécifique,
- **Les diagrammes de type « diagramme de Carrier » d'origine américaine :**
  $(T, r^s)$ Qui donne la température en fonction de l'humidité spécifique ; c'est le plus couramment employé dans le monde ;

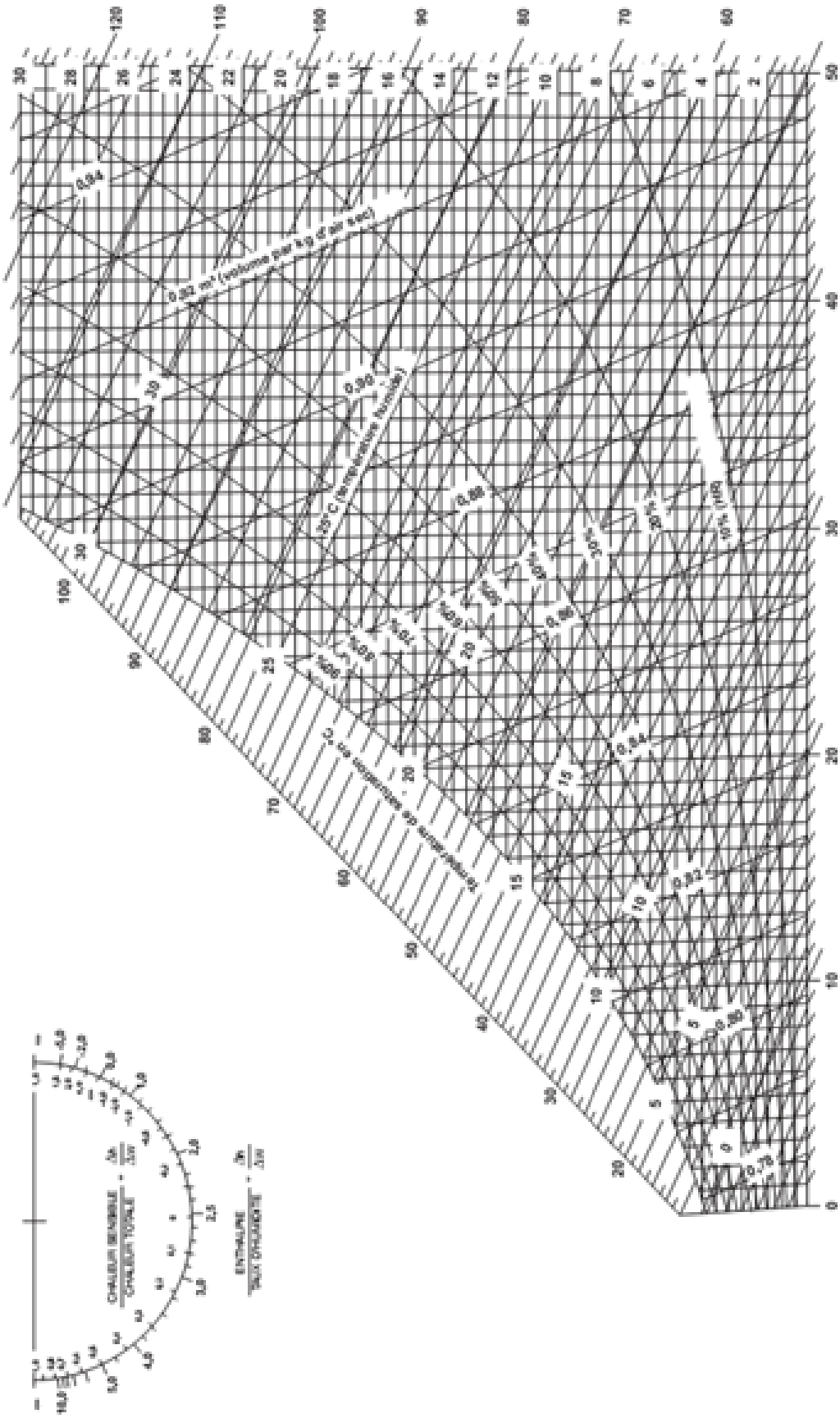

FIGURE *II.5 – Exemple de diagramme de l'air humide [3]*

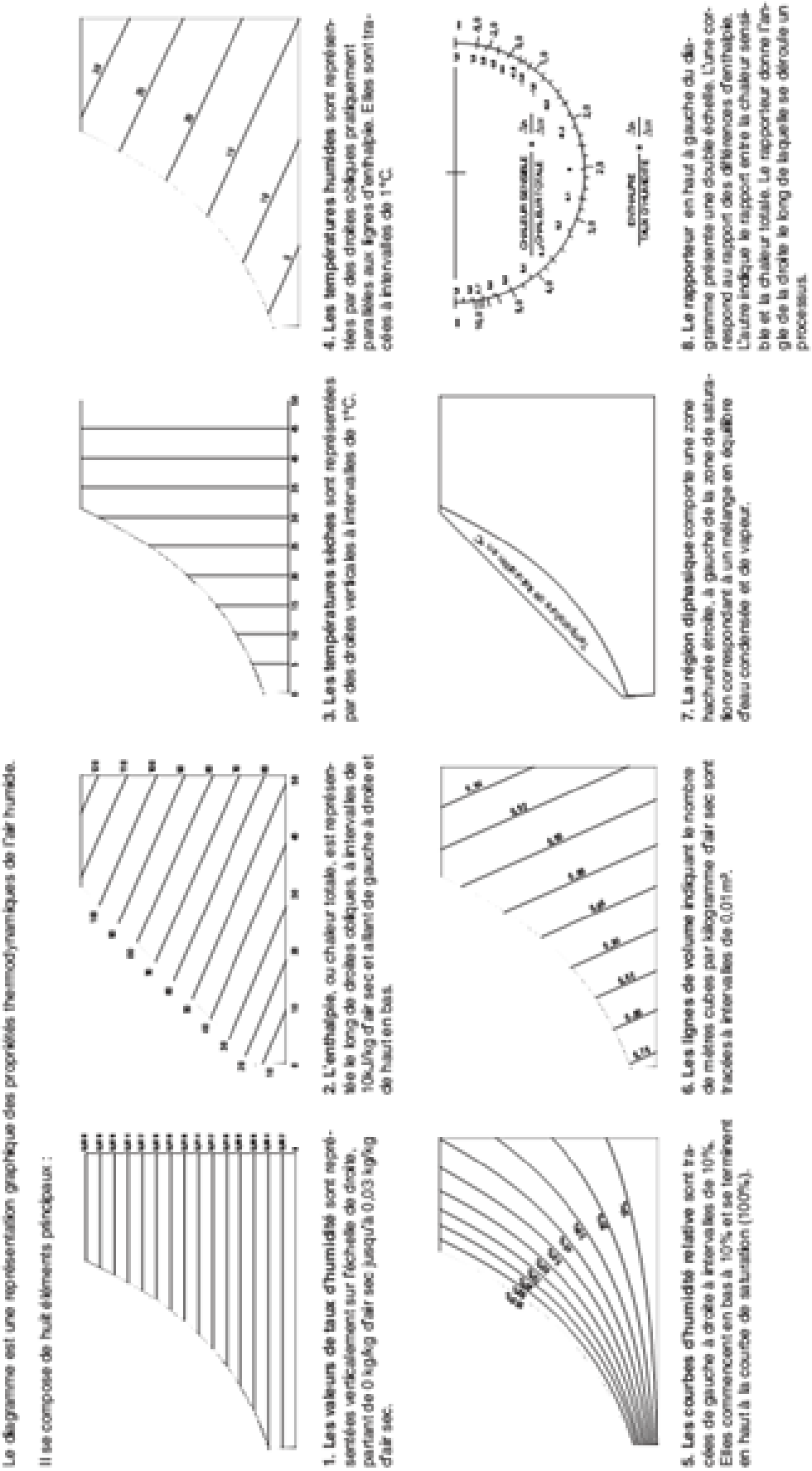


FIGURE *II.6 – les éléments qui composent un diagramme de l'air humide [3]*

## II.4 L'hygrométrie de l'air

### II.4.1 L'hygrométrie

Le mot hygrométrie (hygro : humidité, métrie : mesure) signifie mesure et étude de l'humidité de l'air [3].

### II.4.2 humidité absolue

C'est la quantité d'eau, en grammes, contenue, sous forme de vapeur invisible, dans un volume de 1 mètre cube d'air. Cette quantité d'eau est limitée, au-delà de cette limite, on voit apparaître du brouillard et de la condensation [3].

### II.4.3 humidité relative ou hygrométrie

L'humidité absolue ne suffit pas pour décrire la notion d'humidité et la réaction de la nature et de notre environnement à cette présence d'eau. C'est pourquoi on défini la notion d'humidité relative (HR%). L'humidité relative est le rapport, pour une température donnée, entre la quantité d'eau que contient l'air (humidité absolue) et la quantité maximale qu'il est capable de contenir (valeur de saturation) [2][3]

$$humidité\ relative = \frac{humidité\ absolue}{Valeur\ de\ saturation}.100\% \tag{II.19}$$

L'humidité relative $\Psi$ peut être calculée aussi par le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air $p_v$ et la pression de saturation $p_s$, $T$ de cette vapeur d'eau à la température $T$ :

$$\psi = \frac{P_v}{P_{s,Q}} \tag{II.20}$$

### II.4.4 humidité spécifique

Par définition, l'humidité spécifique $r^s$ est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume $V$ d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume. L'humidité spécifique (on devrait même préciser humidité spécifique en vapeur d'eau) est encore parfois appelée rapport de mélange, humidité absolue, teneur en eau, etc.) [7].

$$r^s = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v^* V}{m_a^* V} = \frac{m_v^*}{m_a^*} = 0,622\frac{p_v}{p - p_v} \tag{II.21}$$

Avec
$m_v^*$ Masse volumique de la vapeur d'eau,
$m_a^*$ Masse volumique de l'air sec.

### II.4.5 Air saturé

On dit que l'air est saturé. La valeur de saturation ($V_s$ en $g/m^3$) est la quantité d'eau maximum que peut contenir l'air, sous forme de vapeur invisible, avant l'apparition du brouillard, cette valeur de saturation est fonction de la température (T en $^\circ$ C) [7].

### II.4.6 Degré de saturation

Le Degré de saturation est le rapport de l'humidité spécifique de l'air $r^s$ à l'humidité spécifique de l'air saturé à la même température $r^s_{s,T}$ [7] :

$$W = \frac{r^s}{r^s_{s,T}} \tag{II.22}$$

### II.4.7 Teneur de l'air en humidité

La teneur en humidité de l'air est une autre grandeur usuelle qui est utilisée dans la théorie et dans la pratique. Elle est définie par le rapport de la masse de la vapeur d'eau qui est contenue dans l'air à la masse de l'air sec [3] :

$$x = \frac{m_v}{m_s} \tag{II.23}$$

### II.4.8 Mesure de l'hygrométrie

L'hygrométrie de l'air (ou taux d'humidité) se mesure directement avec un hygromètre qui affiche directement le résultat [1].

#### II.4.8.1 Thermomètre à bulbe sec et à bulbe humide

a. **psychromètre fronde (à rotation)**
L'appareil doit effectuer trois tours par seconde autour de son axe et pendant une durée de trois minutes. Ce que chacun ne peut faire correctement qu'avec une routine suffisante. L'emploi d'un hygromètre à aspiration est plus indiqué, car la mesure est plus précise, et parce qu'elle élimine plusieurs insuffisances humaine [1].

b. **psychromètre à aspiration d'Assmann**
Dans cet appareil, la rotation est remplacée par un ventilateur aspirant commandé par un mouvement d'horlogerie ou par un petit moteur électrique. Ce ventilateur aspire l'air dont on veut mesurer l'humidité dans deux tubulures, dans lesquelles sont placés les réservoirs des thermomètres sec et humide, ce qui permet de garantir une vitesse d'air constante de 2 à 4 m/s. ces appareils sont construits pour que les deux thermomètres ne soient pas soumis aux influences extérieures (comme le rayonnement calorifique de l'environnement) pendant la mesure et la lecture [1].

c. **L'hygromètre à cheveux**
L'élément de mesure de cet appareil est constitué par un faisceau de cheveux humains ou par des fibres synthétiques. Le faisceau de cheveux est fixé à ces deux extrémités sur des barrettes dont l'une constitue un point fixe, tandis que l'autre est reliée à un système de leviers. Les variations de longueur du faisceau de cheveux qui sont produites par les modifications de l'humidité de l'air sont transmises par les leviers à l'aiguille indicatrice de l'appareil [1].

FIGURE *II.7 – Hygromètre à cheveux [1]*

d. **L'hygromètre pour la mesure de l'humidité relative des matériaux**
D'après sa forme il est indiqué pour des substances peu résistantes à la pénétration, (comme les textiles, ... etc.). La graduation de ces appareils doit être établie spécialement pour correspondre au matériau à mesurer.

e. **Appareils de précision à indication rapide**
Un indicateur de l'humidité de l'air est très précis et avec un temps de réponse de quelques secondes, cet appareil est tout particulièrement indiqué pour l'étalonnage des hygrostats des hygromètres et des appareils de contrôle ainsi que pour des mesures au cours de processus technique chaque fois que des mesures continues. L'étendue de la mesure est comprise entre 20% et 90% d'humidité avec une tolérance de ±2,5% dans la zone de mesure [1].

f. **L'hygromètre à miroir pour le point de rosée**
Cet appareil permet de déterminer avec précision la température du point de rosée. Il se compose d'un thermomètre, d'un miroir et d'une poire manuelle pour insuffler l'air.
Mode de fonctionnement :
Lorsqu'on comprime la poire, l'air est soufflé par une tubulure dans de l'éther qui s'évapore partiellement en refroidissant le miroir. La température du thermomètre est lue dés que la vapeur de l'eau se condense sur la surface du miroir. C'est la température du point de rosée [1].

g. **hygromètre à chlorure de lithium**
Cet hygromètre se compose d'un thermomètre à tige dont le réservoir est entouré par un manchon en tissu synthétique, autour duquel sont enroulés en spirale deux électrodes. Le manchon est imprégné avec une solution de chlorure de lithium, qui est hygroscopique, absorbe de la vapeur d'eau de l'air environnant et lorsqu'il s'humidifie devient conducteur. Sous l'effet d'un réchauffement par une résistance électrique, le manchon se déshydrate presque complètement, ce qui réduit fortement l'intensité du courant qui passe entre les électrodes. Lorsque la pression de vapeur d'eau de l'humidité et celle de l'air environnant sont en équilibre, après la succession de plusieurs cycles du processus qui vient d'être décrit, il s'établit une température de l'équilibre qui reste en équilibre qui reste en relation directe avec le point de rosée. C'est pourquoi l'échelle de cet appareil (l'échelle thermométrique) est aussi graduée en °C de point de rosée. Si l'on détermine en même temps la température humide de l'air à mesurer, il est possible de trouver l'humidité relative dans le diagramme $h$, $x$ [1].

### II.4.8.2 Calcul de la charge d'humidité

L'évaluation du besoin en humidité devient possible à évaluer lorsque toutes les données sont rassemblées $[\frac{kg\ en\ eau}{h}\ ou\ \frac{kg\ en\ vapeur}{h}]$ [6] :

$$m_w = V_1.eM_p.\Delta x \tag{II.24}$$

Avec les symboles suivants :
$m_w$ : besoin en humidité $kg\ d'eau/h$
$V_a$ : débit volumique de l'air
$eM_p$ : masse volumique de l'air au point de mélange $kg/m^3$
$\Delta x \ = \ x_{local} - xM_p\ kg/kg\ d'air\ sec$
$T_w$ : température de l'eau en ° C

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} \ = \ h_w \ = \ c_w.T_w\ kJ/kg\ eau \tag{II.25}$$

# II.5 Changement d'état de l'air humide

## II.5.1 Variation de la seule température de l'air

Tous les changements d'état de l'air humide au cours desquels seul la température de l'air varie, c'est à d que l'humidité reste constante, peuvent être cernés au moyen d'équations de bilan très simples. On rapporte l'indice 1 à l'état initial et l'indice 2 à l'état final, on a [3]
Bilan-masse :

$$\dot{m}_{as,1} = \dot{m}_{as,2} = \dot{m}_{as} \tag{II.26}$$
$$x_1\dot{m}_{as} = x_2\dot{m}_{as} \tag{II.27}$$
$$x_1 = x_2 \tag{II.28}$$

Bilan-énergie :

$$\dot{m}_{as}.h_1 + \dot{Q} = \dot{m}_{as}.h_2 \tag{II.29}$$
$$\dot{Q} = \dot{m}_{as}.(h_2 - h_1) \tag{II.30}$$

Ce changement d'état évolue le long d'une droite verticale, dans le diagramme de l'air humide de type Mollier, le sens du changement d'état étant soit vers le haut dans le cas d'un réchauffage (Q>0 fourniture d'une certaine quantité d'énergie thermique), soit vers le bas dans le cas d'un refroidissement sans condensation (Q<0 retrait d'une certaine quantité d'énergie thermique).

## II.5.2 Variation de la seule humidité absolue de l'air

Une variation de la seule humidité absolue de l'air sans variation simultanée de la température n'a pas lieu que très rarement dans la réalité et encore sous certaines conditions [3].

## II.5.3 Variation simultanée de la température et de l'humidité absolue

Les changements d'état les plus fréquents dans le conditionnement de l'air sont ceux pour lesquels il ya transfert et de chaleur et de matière si bien qu'il ya variation simultanée et de la température et de l'humidité absolue. Si l'on représente l'état 1 de l'air n ° 1 et l'état 2 de l'air n ° 2 dans un diagramme de l'air humide (figure II.8), le point $M$ représentatif du mélange d'air doit nécessairement se trouver sur la droite joignant l'état 1 à l'état 2. Il divise la droite de mélange 1-2 en deux segments qui sont à la longueur totale 1-2 dans le même rapport que les masses d'air sec

correspondants [3] :

$$l_1 + l_2 = l_{tot} \tag{II.31}$$

$$\frac{l_1}{l_{tot}} = \frac{\dot{m}_{as,1}}{\dot{m}_{as,1} + \dot{m}_{as,2}} \; ; \frac{l_2}{l_{tot}} = \frac{\dot{m}_{as,2}}{\dot{m}_{as,1} + \dot{m}_{as,2}} \tag{II.32}$$

Par conséquent :

$$l_1 = \frac{\dot{m}_{as,1}}{\dot{m}_{as,M}}.l_{tot} \; et \; l_2 = \frac{\dot{m}_{as,2}}{\dot{m}_{as,M}}.l_{tot} \tag{II.33}$$

Le point $M$ se trouve toujours plus près de l'état représentatif du débit-masse d'air sec le plus important.

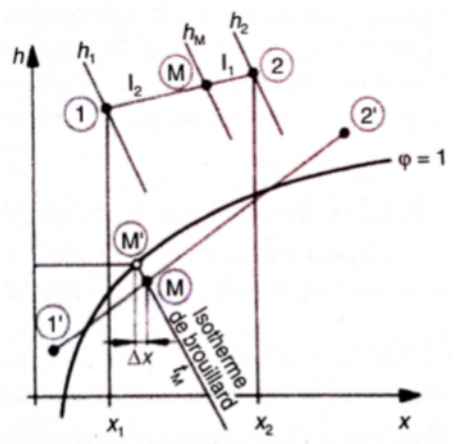


FIGURE *II.8 – Létat final de l'air suite au mélange de deux masse d'air d'états initiaux 1 et 2 [3]*

#### II.5.3.1 Cas ou il ya humidification adiabatique de l'air (humidificateurs adiabatiques)

Les équations donnant les bilans sont les suivantes [3][7] :
Bilan-masse :

$$\dot{m}_{as}.x_1 + \dot{m}_{ve}(\; ou \; \dot{m}_{el}) = \dot{m}_{as}x_2 \tag{II.34}$$

$$x_2 - x_1 = \frac{\dot{m}_{ve}(\; ou \; \dot{m}_{el})}{\dot{m}_{as}} \tag{II.35}$$

Bilan-énergie :

$$\dot{m}_{as}.h_1 + \dot{m}_{ve}.h_{ve}(\; ou \; \dot{m}_{el}.h_{el}) = \dot{m}_{as}.h_2 \tag{II.36}$$

$$h_2 - h_1 = \frac{\dot{m}_{ve}.h_{ve}(\; ou \; \dot{m}_{el}.h_{el})}{\dot{m}_{as}} \tag{II.37}$$

D'où on tire

$$\frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = h_{ve}(\; ou \; h_{el}) \tag{II.38}$$

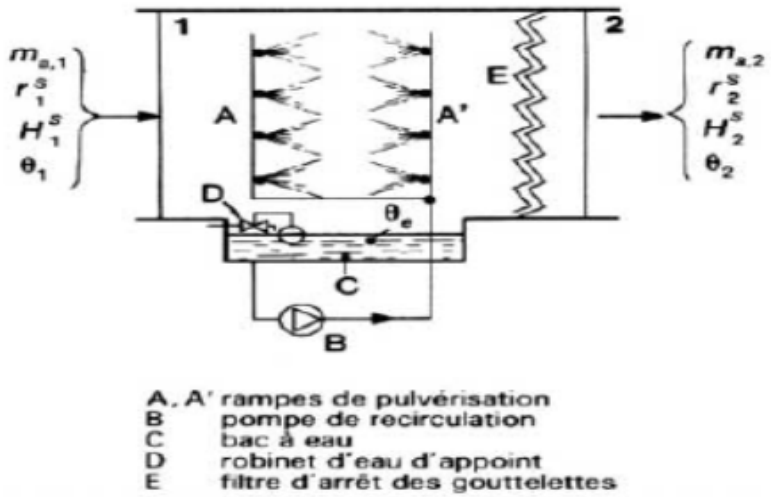


FIGURE *II.9 – Humidification adiabatique de l'air par injection d'eau [3]*

#### II.5.3.2 Cas ou il ya humidification non adiabatique de l'air (humidificateur-laveurs non adiabatiques)

Les équations donnant les bilans sont [3][7]
Bilan-masse :

$$\dot{m}_{as}.x_1 + \dot{m}_{el,ap} = \dot{m}_{as}.x_2 + \dot{m}_{el,ev} \tag{II.39}$$

Bilan-énergie :

$$\dot{m}_{as}.h_1 + \dot{m}_{el,ap}.c_{el}.T_{ap} + \dot{Q} = \dot{m}_{as}.h_2 + \dot{m}_{el,ev}.c_{el}T_{ev} \tag{II.40}$$

$\dot{m}_{el,ev}$ : Débit-masse d'eau liquide évacuée (en vue d'assurer la purge de déconcentration) en $kg/s$
$\dot{m}_{el,ap}$ : Débit-masse d'eau liquide d'appoint $kg/kg$
$c_{el}$ : Capacité thermique massique moyenne de l'eau à la température considérée $kJ/kg.K$
$T_{ev}$ : Température de l'eau évacuée pour assurer la purge de déconcentration en $^\circ$ C
$T_{ap}$ : Température de l'eau d'appoint en $^\circ$ C
$\dot{Q}$ : Quantité d'énergie thermique par unité de temps fournie ou soutirée à l'eau en circulation par l'intermédiaire de l'échangeur de chaleur en $kJ/s$

#### II.5.3.3 Cas des tours de refroidissement

Les équations donnant les bilans sont les suivantes [3][7] :
Bilan-masse :

$$\dot{m}_{as}.x_1 + \dot{m}_{el,ap} = \dot{m}_{as}.x_2 + \dot{m}_{el,ev} \tag{II.41}$$

Bilan-énergie :

$$\dot{m}_{as}.h_1 + \dot{m}_{el,ap}.c_{el}.T_{ap} + \dot{m}_{el}.c_{el}.(T_{el1} - T_{el2}) = \dot{m}_{as}.h_2 + \dot{m}_{el,ev}.c_{el}T_{ev} \tag{II.42}$$

# II.6 L'eau : Les notions importantes pour l'humidification de l'air

## II.6.1 Les notions importantes pour l'humidification de l'air

### II.6.1.1 La notion de dureté de l'eau

C'est une caractéristique importante pour l'humidification de l'air car elle détermine si l'eau nécessite un traitement ou pas. Le rapport du calcium au magnésium est considérablement important l'interprétation d'une analyse d'eau [3].

$$dureté\ temporaire + dureté\ permanente = dureté\ totale \tag{II.43}$$

### II.6.1.2 La valeur du pH

La valeur du Ph détermine si l'eau est acide, neutre ou alcaline, son échelle va de 0 à 14 [3]

Table *II.2 – Détérmination des valeurs du pH de l'eau*

| | |
|---|---|
| Eau normale | Valeur du pH = 7,0 |
| Eau traité | Valeur du pH = 8 et plus |
| Eau de zones marécageuses | Valeur du pH =5 à 6 |
| Eau douce avec gaz carbonique libre | Valeur du pH = 5 à 6 |
| Eau minérale chargée de gaz carbonique | Valeur du pH = 4 à 6 |

### II.6.1.3 Le Degré hydrotimétrique de l'eau

La définition du Degré hydrotimétrique diffère d'un pays à l'autre [3].

Table *II.3 – Différentes définitions du degré hydrotimétrique*

| | |
|---|---|
| En France | le titre hydrotimétrique ou alcalimétrique est définit par la quantité de $CaCO_3$ en centigrammes par litre d'eau. |
| En Allemagne | le titre hydrotimétrique ou alcalimétrique est définit par la quantité de $CaO$ en centigrammes par litre d'eau. |
| Pour les anglais | le titre hydrotimétrique ou alcalimétrique est définit par la quantité de $CaCO_3$ en graines par gallon d'eau. |

Table *II.4 – Table de conversion en différents degrés hydrotimétriques étrangers*

| | |
|---|---|
| 1 ° dureté française | = 0,56 à dureté allemande |
| | = 0,701 ° dureté anglaise |
| | = 0,584 ° dureté américaine |
| | = 4,003 ° dureté russe |
| | = 10 ppm = 0,56 $mg\ CaCO_3/l$ |

#### II.6.1.4 Eau de différents Degrés hydrotimétriques

L'eau est qualifiée de [3]

Table *II.5 – Eau de différents Degrés hydrotimétriques*

| | |
|---|---|
| De très douce | 0 à 7 Degrés hydrotimétrique |
| De douce | 7 à 14 |
| De dureté moyenne | 14 à 21 |
| De assez dure | 21 à 32 |
| De dure | 32 à 53 |
| De très dure | Au dessus de 53 ° |

### II.6.2 Les composants de l'eau

La dureté de l'eau se compose de [3]

- **Des carbonates :** ils forment la dureté temporaire, la dureté des carbonates

Table *II.6 – Dureté des carbonates*

| | |
|---|---|
| Carbonate de calcium | $CaCO_3$ |
| Bicarbonate de calcium | $Ca(HCO_3)_2$ |
| Carbonate de magnésium | $MgCO_3$ |
| Bicarbonate de magnésium | $Mg(HCO_3)_2$ |

- **Autres sels** ces composés non carbonatés forment la dureté permanente de l'eau

Table *II.7 – Dureté permanente de l'eau*

| | |
|---|---|
| Sulfate de calcium | $CaSO_4$ |
| Sulfate de magnésium | $MgSO_4$ |
| Chlorure de calcium | $CaCl_2$ |
| Chlorure de magnésium | $MgCl_2$ |
| Nitrate de calcium | $Ca(NO_3)_2$ |
| Nitrate de magnésium | $Mg(NO_3)_2$ |

### II.6.3 Critères de la nécessité du traitement de l'eau

La nécessité du traitement de l'eau dépond des critères suivants [3] :

- La qualité de l'eau dont on dispose
- Le mode d'utilisation du local à humidifier
- Le mode d'humidification

1. **Cas des appareils à évaporation** Le traitement de l'eau n'est pas nécessaire pour les appareils à évaporation car ceux-ci sont construits de manière à pouvoir évacuer le dépôt formé par les composants de la dureté, ou à pouvoir éliminer par lessives chimiques, ou à permettre le nettoyage avec une brosse.
2. **Cas des appareils à pulvérisation d'eau** Pour les appareils à pulvérisation d'eau, la nécessité du traitement de l'eau avant la pulvérisation est gérée par
   - Les caractéristiques de l'eau ;
   - Les conditions de situation du local.

   Les composants minéraux de l'eau forment un précipité blanc jaunâtre de poussière fine qui peut être très génant.

### II.6.4 Possibilité du traitement de l'eau

Les appareils de traitement physique de l'eau effectuent des séparations, ils n'éliminent pas les sels mais dans les cas les plus ils les stabilisent.

a. ***La phosphatation (aussi vaccination)***
Les phosphates ont la propriété de stabiliser les composants de la dureté qui restent dans l'eau. Ils évitent dans une large mesure le dépôt du tartre dans les conduites d'eau. Cette méthode est rarement utilisée pour l'humidification de l'air à cause du dépôt de poussière du phosphate ajoutée [3].

b. ***Adoucissement de l'eau***
Dans le procédé d'adoucissement, appelé aussi procédé par l'échange des bases, les ions de calcium qui font la dureté sont échangées par des ions sodium. Ce procédé n'est pas indiqué pour l'humidification car il présente les mêmes inconvénients pour les locaux à humidifier que celles des sels qui forment la dureté[3] .

c. ***déminéralisation totale***
Ce procédé est approprié pour l'humidification de l'air avec de l'eau, la déminéralisation totale s'effectue d'après le principe suivant : Les cations (calcium, magnésium) et les anions (chlorures, sulfates) sont fixés par la résine utilisée pour la déminéralisation. On distingue deux types [3] :

- Le système à deux colonnes,
- Le système à une colonne également appelé couche mixte

Le choix du procédé dépond du débit horaire d'eau à déminéraliser. Pour les débits faibles (jusqu'à 300 $l/h$) on utilise le procédé à couche mixte pour l'humidification de l'air. La capacité d'une installation de déminéralisation totale dépond :

- Du débit d'eau prévu par le constructeur
- De la dureté de l'eau.

L'eau complètement déminéralisée (avec 0,050 de dureté) est agressive. Il y a lieu d'examiner si elle doit être mélangée avec de l'eau non épurée pour l'humidification de l'air.

### II.6.5 Traitement de l'eau après l'humidificateur

Lorsque les atomiseurs à disque ou à gicleurs ont été installés, il est possible d'utiliser de l'eau totalement déminéralisée pour éviter la précipitation de particules minérales dans les gaines, dans les composants de l'installation de conditionnement d'air et dans les locaux qui lui sont raccordés. Et en l'absence de l'eau déminéralisée, il est possible d'installer un filtre spécial pour déminéraliser l'eau après pulvérisation. Ce sont des filtres utilisés pour la séparation de calcium après l'humidification, ils remplissent en plus la fonction de séparateurs de gouttes et leur installation diminue le parcours d'absorption [3].

### II.6.6 Parcours d'absorption

C'est le parcours effectué par les brouillards d'aérosol (produits par des atomiseurs ou par des gicleurs) dans le local ou dans une gaine avant que leur structure d'agrégat se transforme pour leur permettre de devenir un des composants de l'air. Les obstacles rencontrès dans une gaine [1] :

- Tous les éléments incorporés (séparateurs de gouttes, échangeurs de chaleur, appareils de régulation, grilles de sortie d'air, aubages directeurs).
- Tous les changements de section et touts les dérivations
- Tous les changements de direction d'une gaine

#### II.6.6.1 Les facteurs qui influencent le parcours d'absorption

Les facteurs suivants ont une influence importante sur le parcours d'absorption [1]

- La finesse de l'aérosol, qui dépend de la qualité et de la puissance de l'appareil d'humidification. Plus la puissance d'un appareil donné est grande, plus la portion d'aérosol avec des particules supérieures à $2\mu mm$ est importante ;
- La vitesse de l'air dans la gaine ;
- La section de la gaine ;
- L'état de l'air avant l'humidificateur.

# Deuxième partie

# Partie pratique

# Chapitre III

# Application : Calcul des charges et du confort thermique

## III.1 Les apports thermiques

L'évaluation des charges thermiques des locaux à humidifier est un exercice complexe qui prend habituellement beaucoup de temps et représente l'une des étapes les plus importantes dans la conception et le dimensionnement d'un système d'humidification de l'air.

Durant la période estivale, les apports thermiques de l'extérieur ne sont pas seulement dus à la transmission thermique par les parois en fonction du $\Delta T$ extérieur/intérieur mais aussi par insolation (rayonnement solaire). Pour le calcul des charges, l'inertie thermique du local joue un grand rôle dans la restitution du flux solaire. Deux paramètres traduisent le phénomène de l'inertie thermique.

- Le premier de ces paramètres est le déphasage. Le déphasage est la différence entre le moment où il y a transmission thermique instantanée maximale sur une paroi et le moment où cette paroi fournie le maximum de chaleur au local.
- Le second est l'amortissement. L'amortissement est le rapport de l'énergie fournie par la paroi au local sur l'énergie due à l'ensoleillement reçu par celle-ci.

Le déphasage implique que l'énergie restituée par la paroi au local est moins importante que celle reçue par cette dernière lors de l'ensoleillement. Donc, une forte inertie induit un déphasage important ainsi qu'un amortissement important [14][15].

## III.2 Types des charges estivales

Les charges totales estivales comprennent 5 types principaux de charges thermiques [14][15] :

- Les charges thermiques par les parois vitrées, qui sont souvent prépondérantes.
- Les charges thermiques par les parois opaques.
- Les charges thermiques dues au renouvellement d'air.
- Les charges thermiques dues aux occupants.
- Les charges thermiques dues à l'éclairage et aux appareils électroménagers.

### III.2.1 Charges thermiques par les parois vitrées

Le calcul des charges thermiques dues aux parois vitrées peuvent être scindées en deux parties :

- Les charges dues à l'ensoleillement (flux direct et diffus).
- Les charges dues à la transmission thermique (conduction et convection).

#### III.2.1.1 Charges thermiques dues à l'ensoleillement

La charge thermique transmise au local par les parois vitrées peut être relativement importante voir même prépondérante sur la charge totale. De ce fait, il est nécessaire de l'estimer de la façon la plus précise possible. La prise en compte du flux solaire instantané peut conduire à un surdimensionnement des charges qui va forcément influer sur le dimensionnement du système de conditionnement de l'air et sur son coût d'exploitation.
La valeur des charges thermiques totales dues au flux solaire transmises par les parois vitrées (vitrage + menuiserie) au local pour une heure donnée est obtenue de la manière suivante $Q$ $[W]$ :

$$Q_{s_v} \;=\; (A_g.F_{Sol}.fg) \;+\; (A_f.F_{Sol}.f_f) \tag{III.44}$$

- $A_g$ est la plus petite surface visible du vitrage vue des deux cotés de la paroi sans prise en compte des joints de débordement, en $m^2$
- $F_{Sol}$ sont les apports solaires surfaciques en $W/m^2$
- $f_g$ est le facteur solaire du vitrage :

Table *III.1 – Facteurs solaires du vitrage*

| | |
|---|---|
| vitrage non traité | $f_g \;=\; 0,76$ |
| vitrage peu émissif une vitre teintée et une réfléchissante | $f_g \;=\; 0,52$ |
| vitrage peu émissif deux vitres réfléchissantes | $f_g \;=\; 0,48$ |

Afin de prendre en compte le flux solaire sur la menuiserie, les mêmes valeurs vont être utilisées
- $(F_{Sol})$ et un coefficient en fonction du type de menuiserie sera appliqué à ces valeurs.
- $A_f$ est la plus grande des surfaces projetées de la menuiserie prise sans recouvrement vue des deux cotés de la paroi, en $m^2$.
- $f_f$ est le facteur solaire de la menuiserie,

Table *III.2 – Facteurs solaires de la menuiserie*

| | |
|---|---|
| menuiserie bois | $f_f \;=\; 0,44$ |
| menuiserie PVC | $f_f \;=\; 0,42$ |
| menuiserie métal. | $f_f \;=\; 0,46$ |

Afin de simplifié les calculs, pour déterminer la surface vitrée à la surface en tableau, un rapport de 0,7 (70%) peut être utilisé et par là, un rapport de 0,3 (30%) pour la surface de menuiserie par rapport à la surface en tableau. La formule devient alors :

$$Q_{s_v} \;=\; Uw.(A_g \;+\; f_g) \;+\; (A_f.F_{Sol}.f_f) \tag{III.45}$$

$A_{gf}$ étant la surface en tableau de la paroi vitrée, en $m^2$.

#### III.2.1.2 Charges dues à la transmission thermique

Ces charges concernent principalement le rayonnement infrarouge. La transmission thermique résulte du $\Delta T$ extérieur / intérieur et ces charges peuvent être prépondérantes si la paroi vitrée est la majeure partie du temps à l'ombre. Comme elles sont fonction du $\Delta T$ (en fonction de l'heure de la journée), des résultats peuvent être négatifs ce qui signifie qu'il y a déperditions thermiques du local par les parois vitrées et donc rafraîchissement. Le flux thermique par transmission se calcule comme pour les déperditions thermiques à la différence près que le calcul doit être fait pour chaque heure de la journée et ceci afin de déterminer les charges maximales (toutes charges confondues) pour une heure donnée. La formule est $Q_{T_V}$ $[W]$ :

$$Q_{T_V} = U_w(A_g + A_f) + (T_e - T_i) \tag{III.46}$$

- $U_w$ est le coefficient de transmission thermique de la paroi vitrée, en $W/(m^2.K)$.
- $T_e$ est la température de base en fonction de l'heure.
- $T_i$ est la température intérieure généralement prise égale à 25 ° C.

### III.2.2 Charges thermiques par les parois opaques

Cette température traduit l'absorption de chaleur, par la paroi, par une élévation de la température équivalente que l'on obtient d'après la formule :

$$T_{eEqI_v} = T_e + C_p.F_{si}/h_e \tag{III.47}$$

- $F_{si}$ est le flux solaire incident (direct et diffus), en $W/m^2$.
- $h_e$ est le coefficient d'échange superficiel extérieur, en $W/(m^2.K)$. $h_e$ est l'inverse de la résistance thermique superficielle extérieure ($R_{se}$), en $m^2.K/W$.
- $T_e$ est la température extérieure pour l'heure considérée $C_p$ est la capacité d'absorption du parement extérieur de la paroi. $C_p$ dépend de la couleur du parement et les valeurs sont données dans le tableau III.3 :

Table *III.3 – La valeur du $C_p$ en fonction de la couleur du parement extérieur de la paroi*

| **Couleur** | **Blanche** | **Claire** | **Moyenne** | **Sombre** |
|---|---|---|---|---|
| $C_p$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |

La formule pour connaître la charge thermique par les parois opaques pour une heure donnée est $Q_{T_O}$ $[W]$ :

$$Q_{T_O} = U_p.A(T_{eV} - T_i) \tag{III.48}$$

- $U_p$ est le coefficient de transmission thermique surfacique de la paroi, en $W/(m^2.K)$
- $A$ est la surface de la paroi en $m^2$

Dans le cas où les parois intérieures (cloisons ou refends) donnent sur un local non climatisé où la température d'ambiance est susceptible d'être bien supérieure à celle de la pièce étudiée, le flux de chaleur venant de ce local est considéré en régime permanant établi et donc, le calcul des charges thermiques de ces parois est à faire comme pour le calcul des déperditions thermiques soit :

$$Q_{T_O} = U_p.A(T_u - T_i) \tag{III.49}$$

où $T_u$ est la température moyenne du local adjacent et $A$ la surface de la paroi. Gains de chaleur aux travers des parois intérieures sur les locaux adjacents Les apports thermiques dus aux gains de chaleur par conduction des cloisons, plafonds et planchers intérieurs sont calculés selon la formule suivante $Q[W]$ :

$$Q_{ext} \ = \ U.A.(T_e \ + \ T_b) \tag{III.50}$$

- $A$ : surface cloisons, plafonds ou planchers intérieurs ($m^2$)
- $U$ : coefficient transmission thermique ($W/m^2K$)
- $T_b$ : température de l'air de la zone adjacente ( $^\circ$C)
- $T_i$ : température de l'air intérieur du local à climatiser ( $^\circ$C)

## III.2.3 Charges thermiques dues au renouvellement d'air

Pour évacuer la pollution émise par les occupants, il est nécessaire de renouveler l'air ambiant. L'air extérieur entrant dans les locaux crée une charge thermique qui doit être prise en compte.

Le calcul des charges thermiques par renouvellement d'air doit alors être scindé en deux parties :

- Les charges dues à la chaleur sensible de l'air.
- Les charges dues à la chaleur latente de l'air.

### III.2.3.1 Charges thermiques sensibles

Les charges thermiques sensibles se calculent de façon simple en appliquant la formule suivante $Q_{A_S}$ $[W]$ :

$$Q_{A_S} \ = \ V.0,34(T_e \ - \ T_i) \tag{III.51}$$

V étant le débit volumique en $m^3$, 0,34 est la capacité thermique volumique de l'air en $Wh/m^3.K$ donnée par le Centre Scientifique et Technique de Bâtiment(CSTB). En été, la valeur moyenne est plutôt 0,33 $Wh/m^3.K$.

### III.2.3.2 Charges thermiques latentes

Pour calculer les charges thermiques par chaleur latente, il est nécessaire de procéder à une conversion entre le débit volumique ($m^3/h$) et le débit massique ($kg/h$) avec une des deux formules suivantes $M$ $[kg/h]$ :

$$M \ = \ V/0,84 \ ou \ M \ = \ V.1,19 \tag{III.52}$$

0,84 est le volume spécifique, en $m^3/kg$ et 1,19 est la masse volumique en $kg/m^3$. Pour pouvoir effectuer les calculs, il est nécessaire de connaître l'humidité absolue de l'air extérieur et de l'air intérieur. C'est la différence d'humidité absolue par le débit massique qui va donner la charge thermique latente. Pour pouvoir déterminer l'humidité absolue d'un air en fonction de sa température et de son hygrométrie un diagramme de l'air humide peut être utilisé ou alors, passer par différentes formules. Pour ceci, il faut avoir la pression partielle de vapeur ($p_v$) de l'air en fonction de son hygrométrie et ceci en partant de sa pression de vapeur saturante ($p_{vs}$). Une des formules (parmi les plus approchantes) permettant l'obtention étant la suivante $p_{vs}$ $[Pa]$ :

$$p_{vs} \ = \ 611.\exp^{(7,257.10^{(-2)}.T-2,937.10^{(-4)}.T^2+9,81.10^{(-7)}.T^3-1,901.10^{(-9)}.T^4)} \tag{III.53}$$

Donc, la pression partielle de vapeur est $p_v$ $[Pa]$ :

$$p_v \ = \ p_{vs}.HR \tag{III.54}$$

HR est le taux d'humidité relative de l'air (taux d'hygrométrie). On arrive ensuite à la formule pour connaître l'humidité absolue en $kg\ d'eau\ /\ kg\ d'air\ sec$ :

$$r = \frac{0,6221.p_v}{p_0 - p_v} \tag{III.55}$$

$P_0$ étant la pression atmosphérique au niveau de la mer (niveau zéro) prise égale à 101325 $Pa$ La formule pour la charge thermique latente est $Q_{A_L}$ $[W]$ :

$$Q_{A_L} = 0,872.V.(r_{airExt} - r_{airInt}) \tag{III.56}$$

$r_{airExt}$ et $r_{airInt}$ sont les humidité absolues de l'air extérieur et intérieur, en gramme d'eau par $kg\ d'air\ sec$ ($g_{eau}/\ kg_{air_sec}$).

### III.2.4 Charges thermiques dues aux occupants

La méthode utilisée ici est issue de la norme EN ISO 7730 traitant du confort des occupants dans des locaux à ambiance thermique modérée. La norme stipule que les occupants sont en situation de confort quand le pourcentage prévisible d'insatisfaits ($PPD$) est inférieur à 10% ce qui correspond à un vote moyen prévisible ($PMV$) de -0,5 à 0,5 sur l'échelle de satisfaction. A 30 ° C il n'y a guère plus qu'une situation de confort. L'analyse des diverses situations démontre que le métabolisme doit réduire lorsque la température opératoire augmente. Donc, si le métabolisme décroît, la quantité de chaleur, latente et sensible, à évacuer par l'organisme décroît elle aussi. Comme pour le renouvellement d'air, les charges thermiques dues aux occupants sont scindées en deux parties :

- Les charges dues à la chaleur sensible du corps humain.
- Les charges dues à la chaleur latente du corps humain.

Comme l'étude des charges thermiques, ne concerne que la période estivale, la tenue vestimentaire des occupants est une tenue plutôt légère et dans ce cas, les valeurs disponibles dans la liste de choix du classeur ne le sont que pour cette période.

### III.2.5 Charges thermiques dues à l'éclairage et aux appareils électro-ménagers

#### III.2.5.1 Charge dues à l'éclairage

La tendance actuelle est de partir du principe que l'énergie électrique consommée par l'éclairage est intégralement transformée en chaleur. De ce fait, la charge due à l'éclairage est seulement une charge de chaleur sensible. Les charges dues aux éclairages sont égales à la puissance installée en ce qui concerne les lampes à incandescence (spots halogènes, ampoules classiques) $Q_E$ $[W]$ :

$$Q_E = P_{Eclairage} \tag{III.57}$$

Pour des locaux commerciaux et afin de simplifier, $P_{Eclairage}$ peut être pris pour 40 $W/m^2$ et pour cela, la formule devient :

$$Q_E = S.P_{Eclairage} \tag{III.58}$$

En ce qui concerne les lampes à fluorescence (tubes Néons), on majore la puissance installé de 15% :

$$Q_E = 0,15.P_{Eclairage} \tag{III.59}$$

Pour des locaux commerciaux, $P_{Eclairage}$ peut être pris pour 10 $W/m^2$. La formule est alors :

$$Q_E = S.P_{Eclairage}.0,15 \tag{III.60}$$

$S$ étant la surface du local, en $m^2$. Pour les pièces d'habitations $P_{Eclairage}$ est la puissance installée

#### III.2.5.2 Charges dues aux appareils électroménagers

La chaleur dégagée par les appareils électroménagers est principalement de la chaleur sensible. Comme pour l'éclairage, c'est la puissance électrique de l'appareil qui est à prendre en compte en fonction de la durée de fonctionnement par heure $Q_{APP}$.

$$Q_{APP} = P_{appareil}.durée_{mn}/60 \tag{III.61}$$

$durée_{mn}$ est la durée d'utilisation en minutes/heure Dans le tableau III.4 sont indiqués quelques valeurs de puissance d'appareils ainsi que la durée possible d'utilisation.

Table *III.4 – Puissance des appareils en fonction de la durée de fonctionnement*

| Appareils | Puissance en W | durée de fonctionnement en minutes |
|---|---|---|
| Téléviseur | 175 | 60 |
| Ordinateur | 100 | 60 |
| Aspirateur | 1200 | 15 |
| Four | 3000 | 60 |
| Plaque de cuisson | 3000 | 60 |
| Fer à repasser | 1000 | 60 |
| Lave linge | 6000 | 60 |
| Lave vaisselle | 5000 | 60 |
| Réfrigérateur | 200 | 30* |
| Robot | 1000 | 5 |

* La durée de fonctionnement est en continue mais le fonctionnement du compresseur est géré par un thermostat qui coupe le fonctionnement quand la consigne est atteinte.

## III.3 Programme de calcul des charges thermiques

Bilan des charges thermiques est un programme intuitif, il fonctionne en s'intégrant dans l'environnement de MatLab. Ce programme est un programme de calcul qui assure l'automatisation des tâches sur une interface graphique de calcul créé sur MatLab.

## III.4 Caractéristiques et fonctions du programme

Ce programme de calcul sur MatLab permet d'effectuer les calculs de bilans thermiques et de déperditions pour les locaux à humidifier et notamment de calculer le confort thermique associé. Il tient compte tout particulièrement des conditions de fonctionnement et des particularités spécifiques, telles que :

- Le mois, le jour et l'heure choisie.
- Les conditions de température extérieure et intérieure des locaux.
- L'humidité extérieure et intérieure.
- Les caractéristiques de l'air extérieur évoluant le long de la journée ;
- Les occupants présents dans le local.

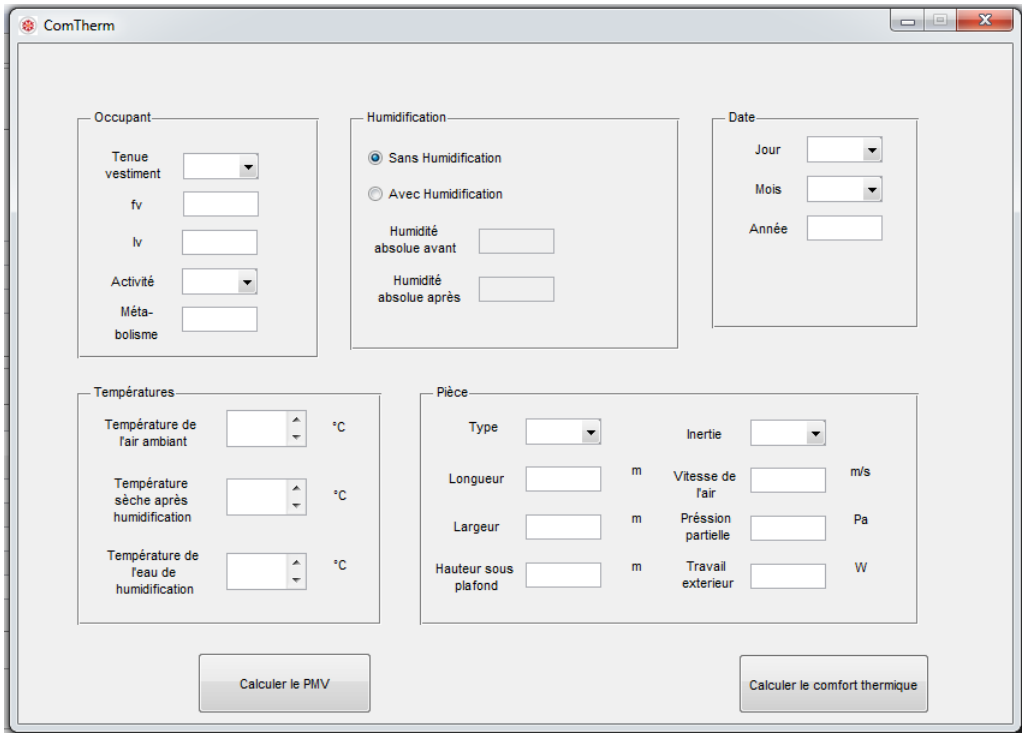


FIGURE *III.1 – Fenêtre principale du programme bilan thermique*

Après saisir les données et remplir les champs vides du programme, chacun des deux boutons se trouvant en bas de la fenêtre joue un rôle différent. Les résultats obtenus seront affichés selon le choix de l'utilisateur nsoit sous forme numériques soit sous forme de graphes comme le montre la figure III.2 :

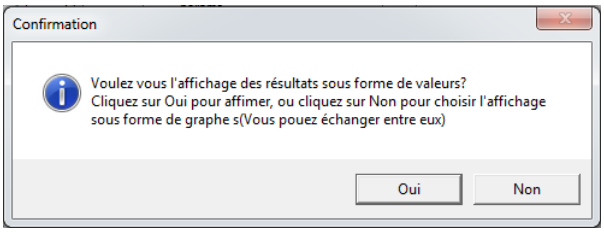


FIGURE *III.2 – Boite de dialogue : choix du type d'affichage des résultats sous forme de graphes ou sous forme numérique*

Lors du choix de l'affichage sous forme de valeurs numériques, la fenêtre des résultats, comme la montre la figure III.3, affiche séparément les valeurs de chaque type de pertes de chaleur de l'occupant.

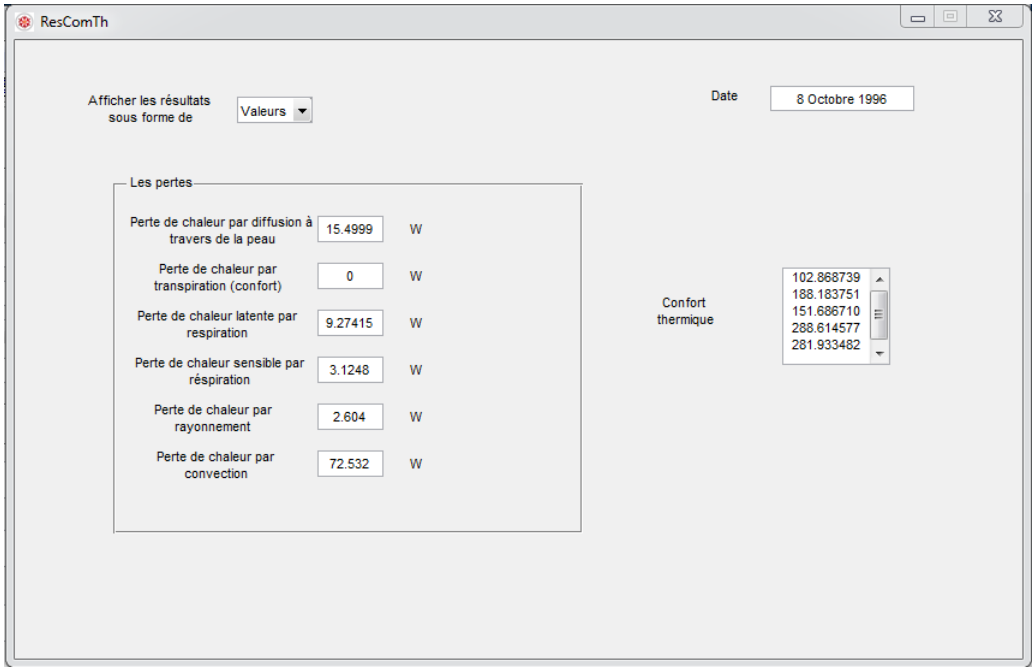


FIGURE *III.3 – Affichage des résultats sous forme de valeurs numériques*

Lors du choix de l'affichage sous forme de graphes, la fenêtre des résultats affiche les graphes comme le montre la figure III.4.

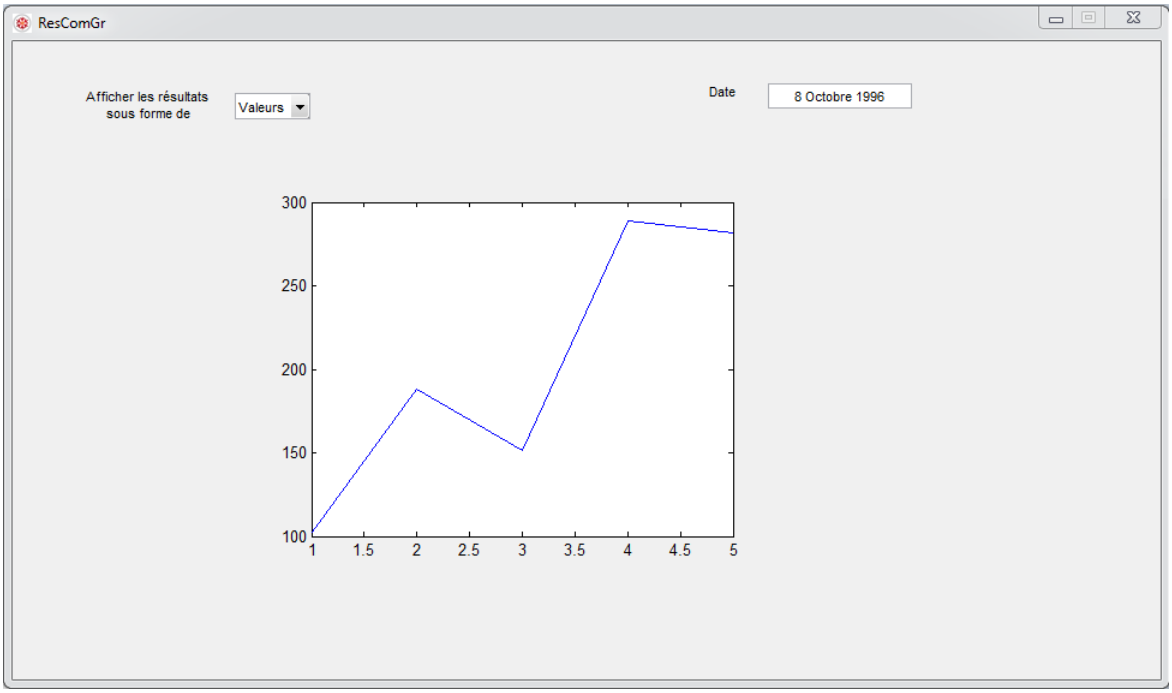


FIGURE *III.4 – Affichage des résultats sous forme de valeurs numériques*

## III.5 Traitement des données expérimentales

Les paramètres caractérisant le systéme et les données numériques utilisées dans ce chapitre sont des données issus de l'expérience réalisée au sein de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (l'URER\MS d'Adrar) en 1995, la période du test expérimental est (16/07 au 02/08), en utilisant un humidificateur par pulvérisation d'eau de type Saclar monté au sein de SEES\MS d'Adrar. Dans ce qui suit nous allons voir :

- La description du système
- La représentation graphique de l'évolution des paramètres caractérisant le système ;
- Calcul des grandeurs constantes importantes pour le confort thermique ;
- Calcul du confort thermique ressenti pour une personne dans deux états (au repos, en activité moyenne) dans ce local avant et après humidification et comparer les deux états ;
- Représentation graphique des résultats du confort ;
- Calcul du vote moyen prévisible et l'indice prévisible de personne insatisfait ;
- Représentation graphique des résultats ;
- Discussion des résultats.

## III.6 Description de l'humidificateur utilisé

L'humidificateur utilisé est un humidificateur par pulvérisation d'eau de type Saclar réalisé au sein de SEES\MS d'Adrar : Le procédé d'humidification utilisé est basé sur l'écoulement d'eau sur un très grand nombre de câble multi-brins tendus verticalement ou bien un coussin de paille. L'air véhicule entre les câbles perpendiculairement à ceux-ci et on obtient de la sorte une très grande surface d'échange le système comprend les éléments suivants :

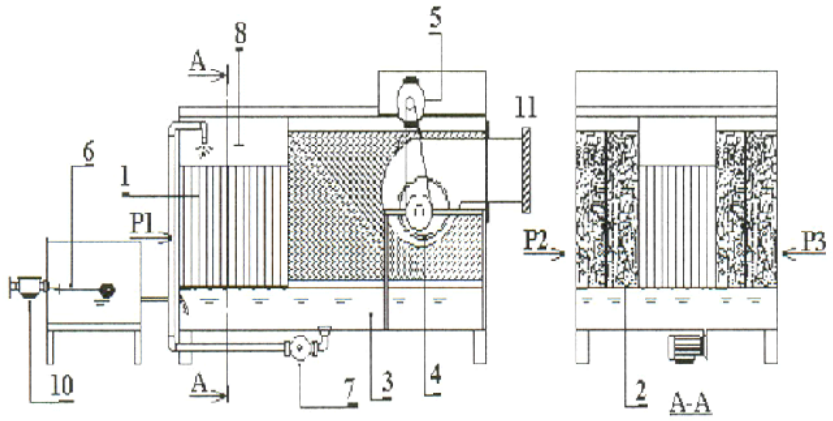


FIGURE *III.5 – Coupe en perspective d'humidificateur d'air [16]*

1. câbles multi brins tendus verticalement
2. un système de distribution d'eau
3. un bac de récolte en acier galvanise
4. le ventilateur
5. support du moteur d'entrainement

6. une tubulure d'alimentation avec robinet flotteur
7. une pompe centrifuge
8. un coussin de paille
9. trois portes d'accès étanches
10. un compteur à eau
11. un diffuseur de gouttelettes a la sortie du caisson d'humidificateur.

### III.6.1 Caractéristiques de l'humidificateur

Table *III.5 – Caractéristiques de l'humidificateur par pulvérisation d'eau utilisé*

| | |
|---|---|
| **Puissance nominale du moteur turbine monophasé** | 1 $kW$ |
| **Puissance nominale de la pompe à eau** | 60 $W$ |
| **Vitesse de rotation de la turbine** | 840 $trs/min$ |
| **Courant nominal** | 2,3 $A$ |
| **débit d'air mesuré** | 2000 $m^3/h$ |
| **Surfaces d'échange à paille : latérales** | 2*54*50*5 $cm$ |
| **Surfaces d'échange à paille : Arrière** | 50*45*5 $cm$ |

## III.7 Description du local

Le local utilisé est un local en préfabriqué tels que :

Table *III.6 – Caratéristiques du local*

| | |
|---|---|
| Longueur | 10 $m$ |
| Largeur | 5 $m$ |
| Hauteur du plafond | 3 $m$ |
| L'inertie du local | faible |

## III.8 Représentation de l'évolution des caractéristiques du système

Dans ce qui suit nous allons voir l'évolution des caractétristiques du système après humidification et nous allons là comprarer avec les données prises avant humidification

### III.8.1 Température

Les températures sèches du local avant et après humidification ainsi que la température humide du local évoluent comme le démontre la figure III.6 :

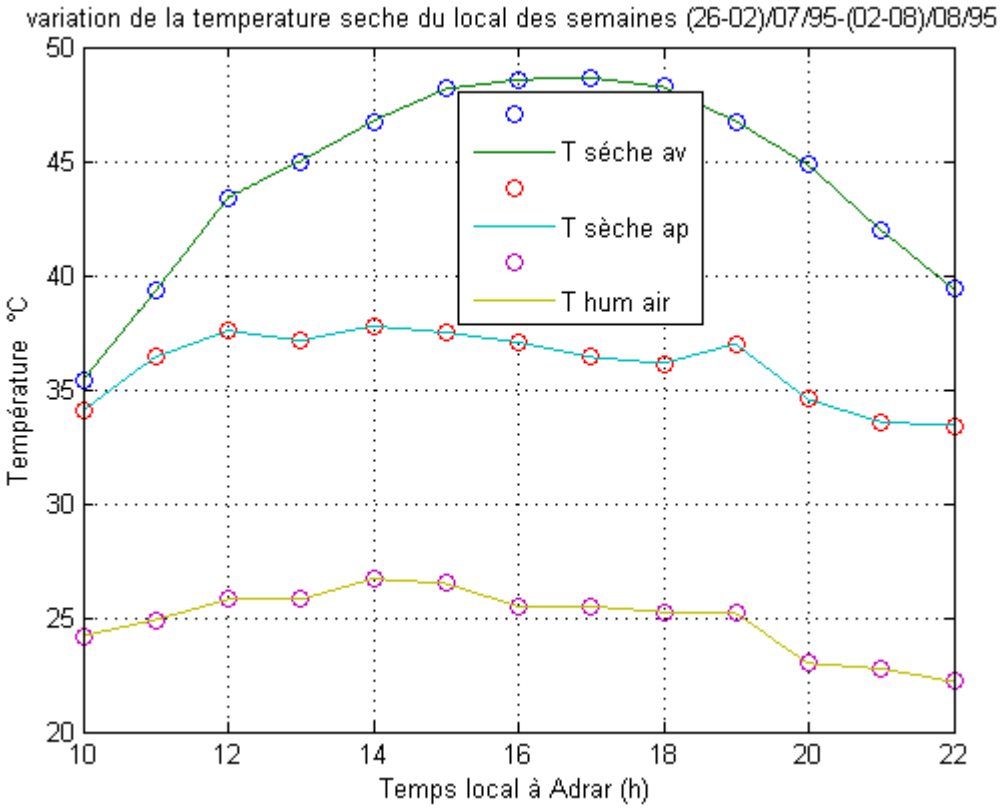


FIGURE *III.6 – Évolution de la température humide de l'air et des températures sèches du local avant et après humidification*

Le graphe sur la figure III.6 indique les températures : sèche avant humidification, sèche après humidification et la température humide de l'air respectivement. On constate que :

- La température sèche avant humidification durant la journée est élevée : elle prend la valeur de 35 ° C à 10 $h$ et reste élevée jusqu'à 22h 40 ° C. Cette température atteint sa valeur maximale près de 16 $h$, il est à noter que cela est dû aux apports thermiques par les parois, la restitution de la chaleur absorbée par les parois durant les heurs du matin se fait après un temps.
- La température sèche après humidification a pris des valeurs plus basses et reste maintenue de 35 ° C.
- La température humide de l'air est maintenue aux environs de 25 ° C.

## III.8.2 L'humidité du système

### III.8.2.1 L'humidité relative du local

L'humidité relative du local évolue le long de la journée comme le démontre la figure III.7 :

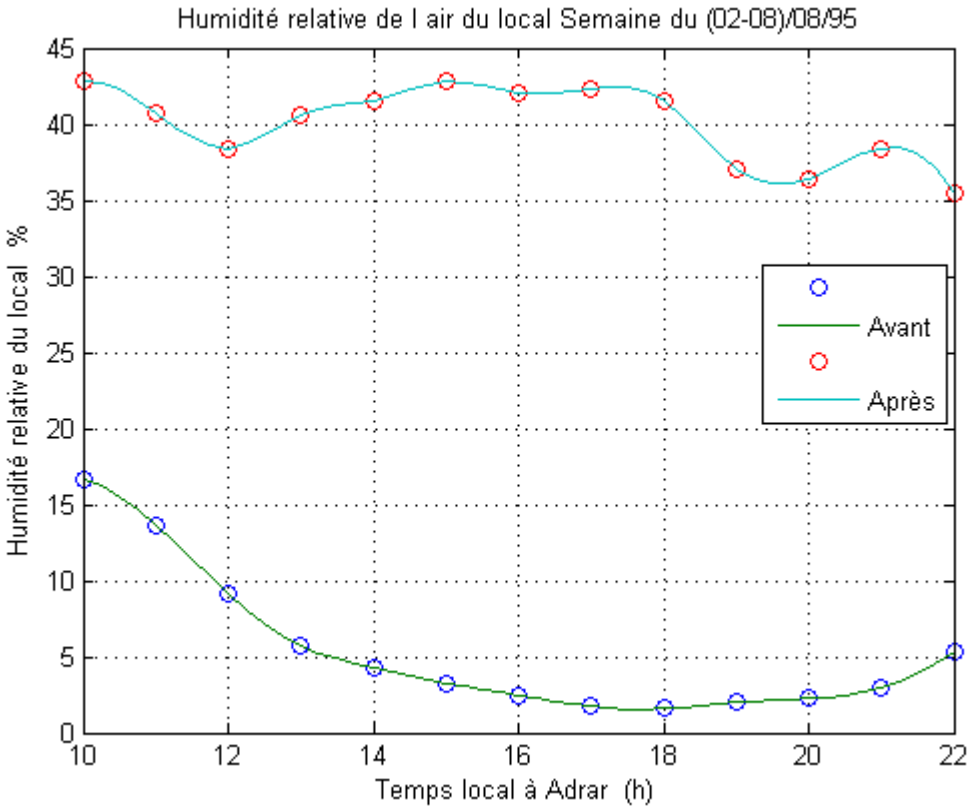


FIGURE *III.7 – Variation de l'humidité relative du local avant et après humidification*

Le graphe sur la figure III.7 indique les humidités relatives du système : avant humidification et après humidification. On constate que :

- Le taux d'humidité relative avant humidification était faible 15% à 10 $h$ et reste en diminution pour atteindre des valeurs inférieures au cours de la journée.
- Après humidification, le taux d'humidité relative a augmenté et ses valeurs étaient autour de 40% durant la journée.

### III.8.2.2 L'humidité absolue du local

L'humidité absolue du local évolue comme le démontre la figure III.8 :

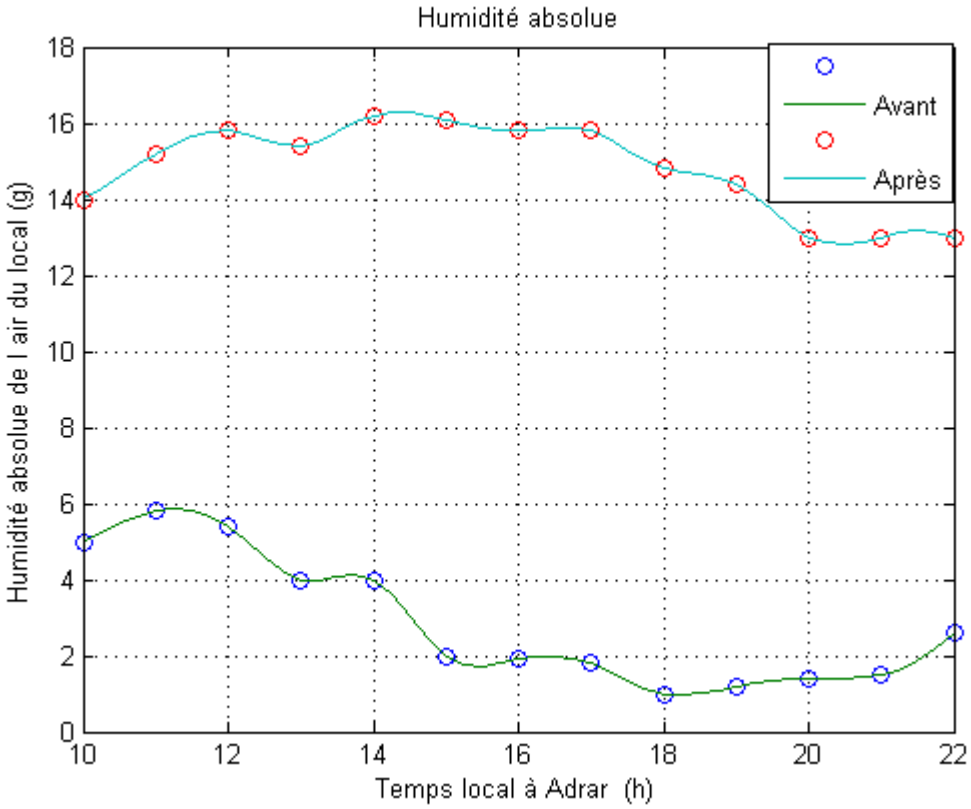


FIGURE *III.8 – Variation de l'humidité absolue du local avant et après humidification*

Le graphe sur la figure III.8 indique les humidités absolues du système : avant humidification et après humidification. On constate que :

- Le taux d'humidité absolue avant humidification était faible près de 5 $g$ à 10 $h$ et reste en diminution pour atteindre des valeurs inférieures à 2 $g$ au cours de la journée.
- Après humidification, le taux d'humidité absolue s'est amélioré et ses valeurs étaient autour de 14 $g$ durant la journée.

### III.8.3 L'enthalpie du système

L'enthalpie du système varie comme le démontre la figure III.9 :

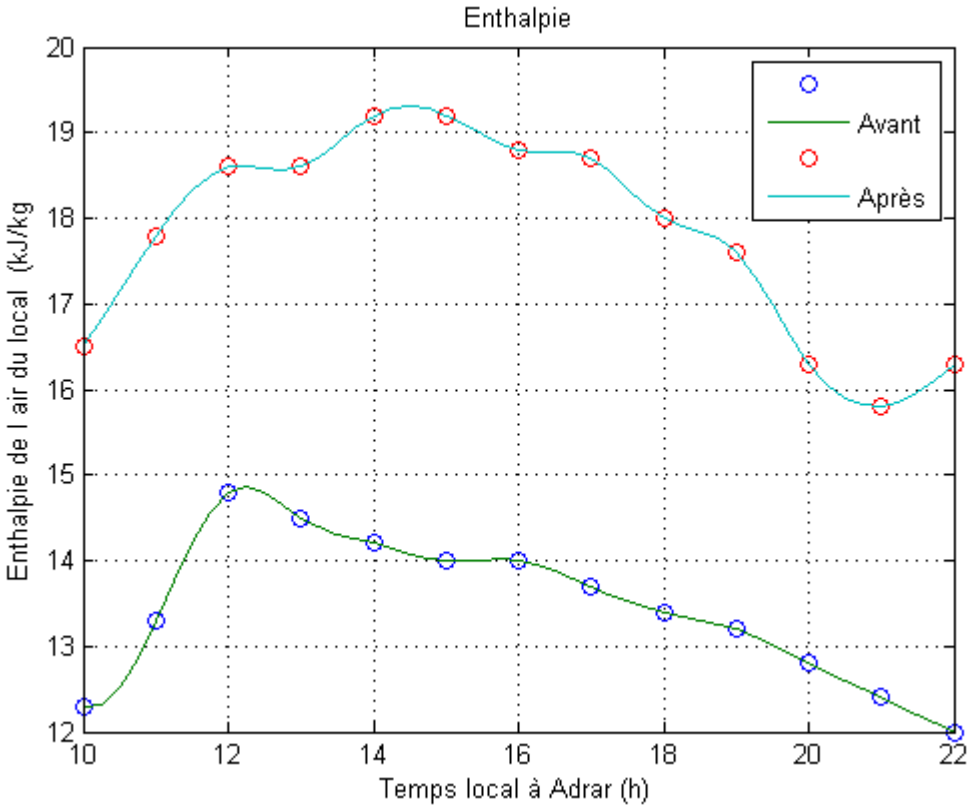


FIGURE *III.9 – Variation de l'enthalpie avant et après humidification*

Le graphe sur la figure III.9 indique les enthalpies du système : avant humidification et après humidification. On constate que :

- L'enthalpie avant humidification était faible près de 12 $kJ/kg$ à 10 $h$ évolue à près de 15 $kJ/kg$ à 12h puis reste en diminution jusqu'à atteindre 12 $kJ/kg$ à 22 $h$.
- Après humidification, la valeur de l'enthalpie s'est améliorée pour atteindre une valeur supérieure à 16 $kJ/kg$ à 10 $h$, et à évoluée au cours de la journée pour atteindre une valeur maximale de 19 $kJ/kg$ après 14 $h$.

### III.8.4 Charge thermique du système

La charge thermique du local est donnée sur la figure III.10 :

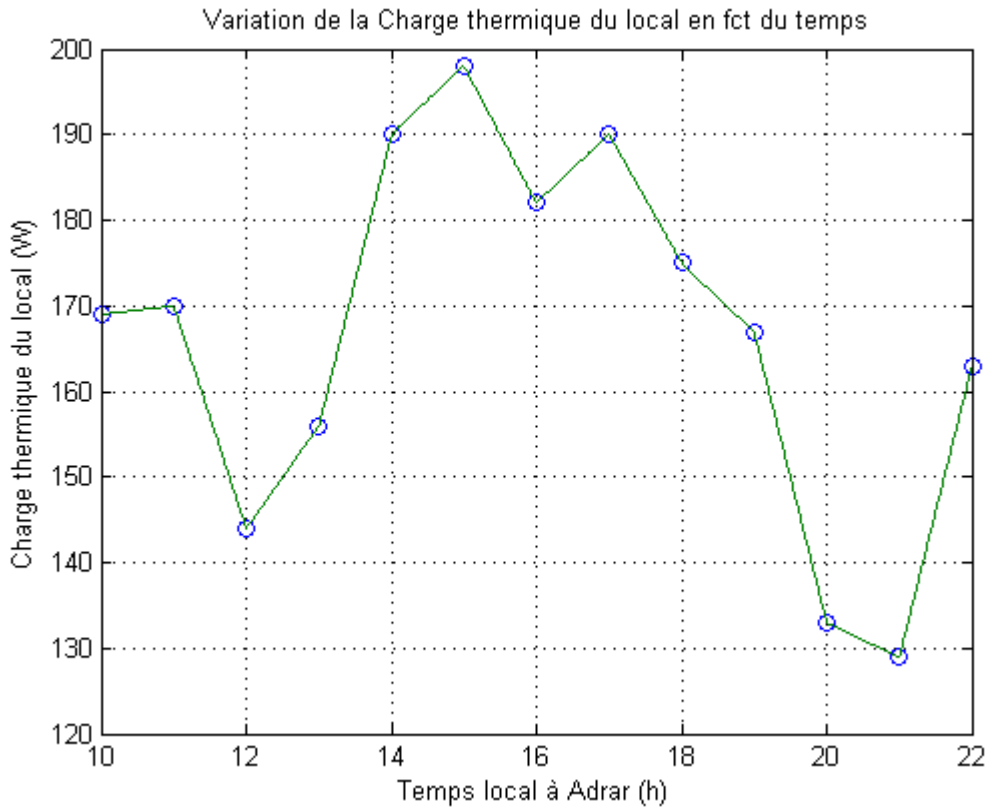


FIGURE *III.10 – L'évolution de la charge thermique du local en fonction du temps*

### III.8.5 Pression partielle

L'évolution de la pression partielle de l'air du local avant humidification est montrée dans la figure III.11 :

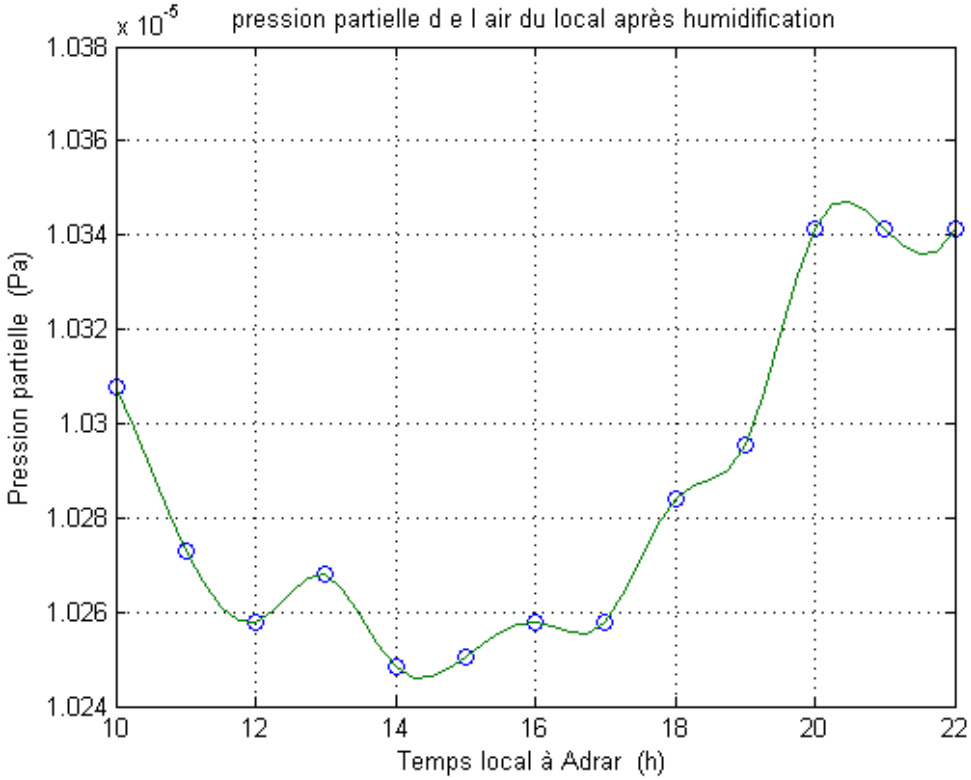


FIGURE *III.11 – L'évolution de la pression partielle du local avant humidification*

L'évolution de la pression partielle de l'air du local après humidification est montrée dans la figure III.12 :

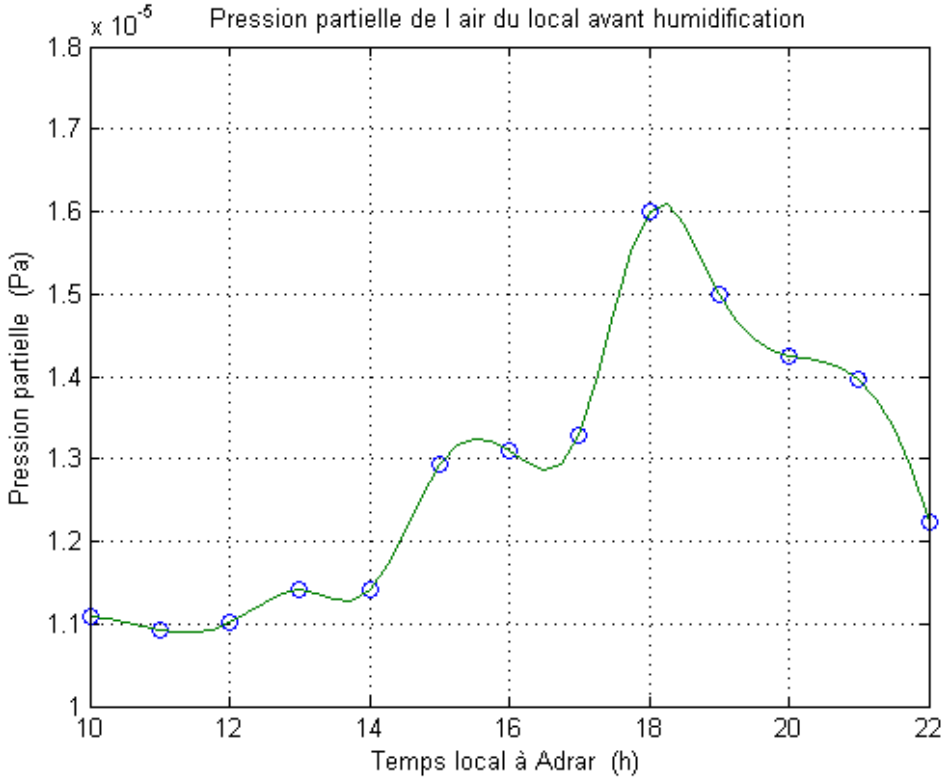


FIGURE *III.12 – L'évolution de la pression partielle du local après humidification*

### III.8.6 La variation du rayonnement solaire

Durant le calcul des paramètres de calcul de l'expérience le rayonnement solaire variait comme le montre la figure III.13

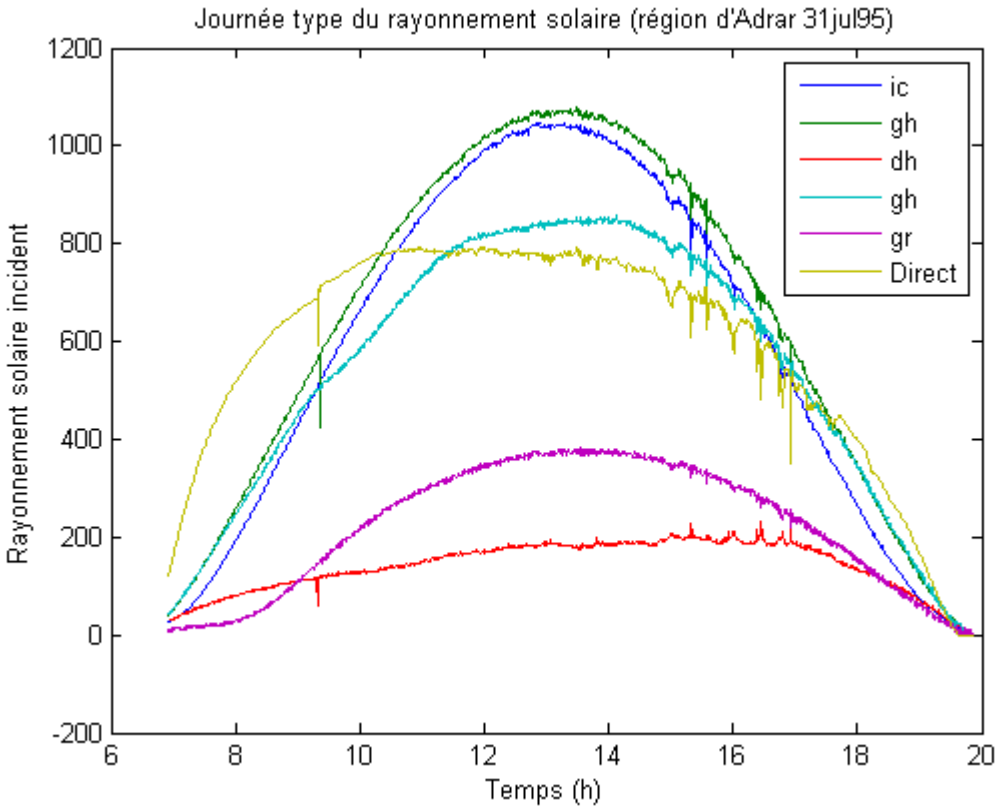


FIGURE *III.13 – La variation du rayonnement solaire*

La figure III.13 représente l'évolution du rayonnement solaire durant une journée type d'été. Les graphes sont respectivement : le rayonnement global incliné à la latitude du lieu ; le rayonnement global horizontal_1 ; le rayonnement global diffus ; le rayonnement global horizontal_2 ; le rayonnement global réfléchi par le sol ; le rayonnement global direct normal.

## III.9 L'évolution du confort thermique du local

### III.9.1 Calcul du confort thermique

Afin de voir l'effet de l'humidification sur un vivant, calculons le confort thermique ressenti par une personne dans ce local dans les conditions avant et après humidification et ainsi voir son évolution au cours du temps. Le graphe sur la figure III.14 indique la variation du confort thermique d'une personne au repos et habillée légèrement dans le local, avant humidification et après humidification. On constate que :

- L'état de confort était trop dégradé dans ce local avant humidification.

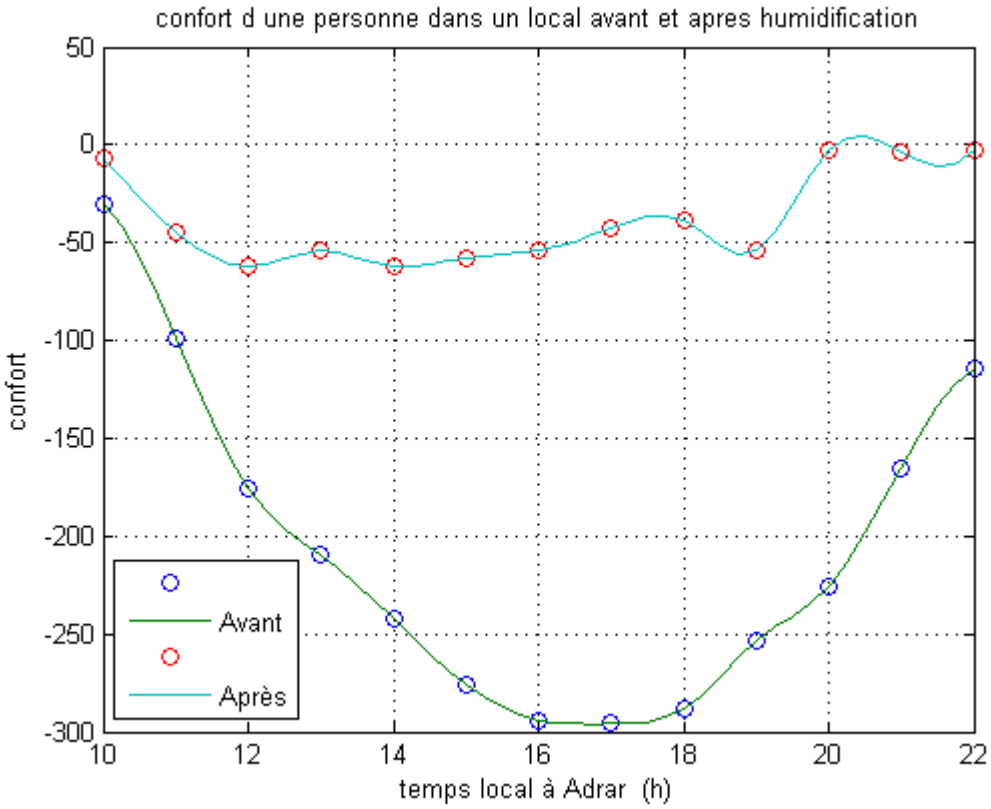


FIGURE *III.14 – Variation du confort thermique du local avant et après humidification*

- L'humidification du local a permis de maintenir l'état de confort autour d'une valeur fixe qui peut se considérer optimal par rapport aux valeurs avant humidification mais qui reste basse par rapport aux normes.

#### III.9.1.1 L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait PPD

L'évolution de l'indice *PPD* au cours de la journée, avant l'humidification du local avait l'allure suivante :

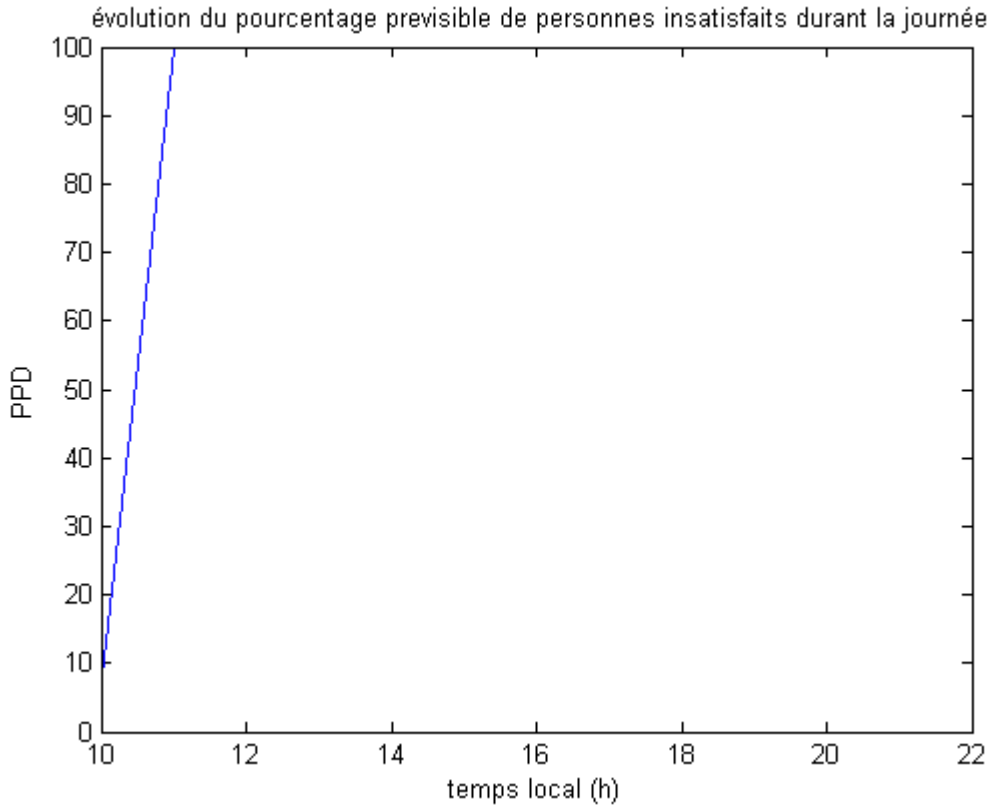


FIGURE *III.15 – L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait PPD avant humidification*

On constate que l'indice de confort (le Pourcentage Prévisible D'insatisfait *PPD*) est maximale au cours de la journée, ce qui démontre l'état dégradé du confort du local.

L'évolution de l'indice *PPD* au cours de la journée, après l'humidification du local avait l'allure suivante :

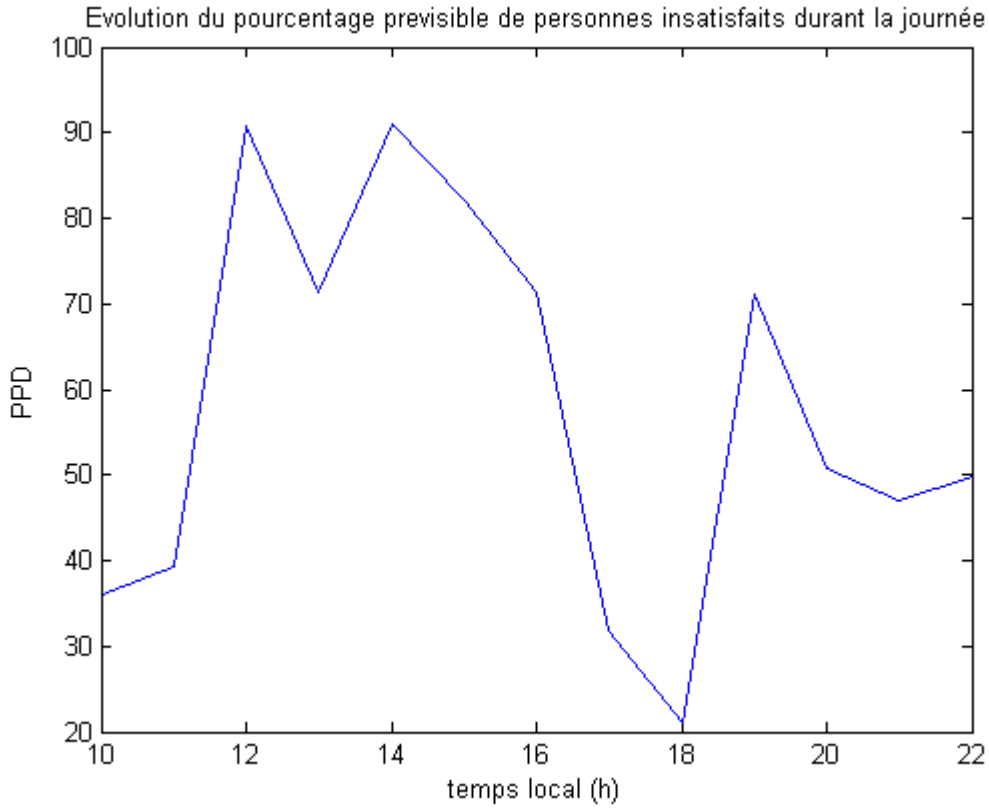


FIGURE *III.16 – L'évolution du Pourcentage Prévisible D'insatisfait PPD après humidification*

La figure III.16 démontre l'amélioration de l'état de confort du système, le taux du Pourcentage Prévisible D'insatisfait *PPD* s'est abaissé c'est à dire que le taux de personnes satisfaites a augmenté.

# III.10 Résultats et discussion

## III.10.1 Explications générales

- Les mesures ont porté sur un système d'humidification de l'air par pulvérisation d'eau d'un local en préfabriqué dans la région d'Adrar.
- En règle générale, les caractéristiques du système avant et après humidification ont été mesuré pendant des semaines types avec un décalage d'une semaine entre les mesures sans humidifcation et avec humidification et ceci en raison de manque d'équipements dans cette période. respectivement la semaine (26-02/07/95) avant humidification et la semaine (02-08/08/95) de l'humidification.
- Les consommations d'eau ont été mesurées lors de la semaine type durant humidification.

## III.10.2 Résultats de l'expérience

Représentation des résultats sous forme de tableau III.7 [16] :

Table *III.7 – Les résultats de l'expérience*

| | |
|---|---|
| **Type d'installation** | Humidificateur par pulvérisation d'eau |
| **Lieu de mesure** | l'URER\MS - Adrar |
| **Température sèche ˚ C** | Maintenue autour de 35 |
| **Taux d'humidité %** | Maintenue autour de 40 |
| **Température humide de l'air ˚ C** | autour de 25 |
| **Débit d'air $m^3$/h** | 2000 |
| **Volume humidifié $m^3$** | 150 |
| **Description des locaux** | Local en préfabriqué |
| **Description de l'installation** | Un humidificateur par pulvérisation d'eau de type Saclar, réalisé au sein de SEES\MS d'Adrar |
| **Fonctionnement** | Acceptable : les paramètres de température et d'humidité se sont améliorés |
| **Besoin en humidification** | Diminuer la charge thermique du local, le confort thermique |
| **Remarque** | Les paramètres du système ont évolué par l'humidification par pulvérisation d'eau mais restent inférieurs aux normes |

## III.10.3 Discussion des résultats obtenus

### III.10.3.1 Discussion des résultats de température

La température du local avant humidification présente une allure périodique similaire à celle du flux solaire global, elle évolue dans le même sens et ordre de grandeur que celui-ci son axe de symétrie est aux environ de 16h. La température est tributaire de l'effet d'action décalé dans le temps de l'éclairement solaire, c'est la réponse avec retard causé par l'inertie atmosphérique à la perturbation d'éclairement solaire.
La température du local après humidification garde la même allure que celle avant humidification et présente son axe de symétrie autour de 14h L'écart de température entre la température avant humidification et celle après humidification de 13.87 ˚ C

### III.10.3.2 Discussion des résultats d'humidité

Le taux d'humidité du local avant humidification évolue dans le sens inverse de la température, le graphe peut être subdivisé en trois parties :

- **Partie 1 :** régression avec un taux de décroissance important à partir du début des testes jusqu'à 14h effet de la charge thermique du local.
- **Partie 2 :** constance d'humidité pratiquement nulle
- **Partie 3 :** progression avec un taux de croissance faible à la fin de la journée, effet de la décharge thermique.

Le taux d'humidité du local après humidification évolue dans le même sens que celui d'avant humidification mais avec des fluctuations autour de sa valeur moyenne 43.78%.
La période critique de l'humidification dure de 11h à 19h et elle est caractérisée par un taux d'humidité stationnaire intéressant.

#### III.10.3.3 Les consignes prescrites sur les températures et l'humidité

Les consignes prescrites sur les températures et l'humidité pour les locaux (19-24 ˚ C) et (40-50%) et pour les serres agricoles (20-30 ˚ C) et (40-90%). Les deux paramètres caractérisant notre système sont (48.08 ˚ C et 5.48%). C'est un état de l'air défavorable pour les utilisateurs de ce local d'où la nécessité d'humidification et de refroidissement pour améliorer sont état de confort.

#### III.10.3.4 Discussion des résultats de confort thermique

L'état de confort du local s'est nettement amélioré mais reste insuffisant par rapport aux conditions exigés par les standards précités. Cela est du à :

- Les conditions de l'isolation thermique en mousse polyuréthane dégradée sous l'effet des conditions atmosphériques.
- L'inertie thermique du local faible : construit en amiante, La diminution de l'inertie du local a un impact réel sur sa demande de chauffage et de refroidissement : elle provoque un glissement de la demande de chaud vers la demande de froid la sensation de confort sera meilleure dans un local lourd, grâce au rayonnement des parois et à l'absence de brusques modifications de température
- Les fuites par changement d'air et par les jointures.
- L'efficacité de l'humidificateur est faible par rapport aux humidificateurs de haute qualité. C'est un humidificateur construit par les matériaux de bort de l'unité de recherche à l'époque.
- Le décalage de mesure des températures avant et après humidification. Les mesures sont effectuées avec un décalage d'une semaine.

Le renforcement de l'isolation thermique et l'inertie du local par les matériaux susceptibles de garder un certain taux d'humidité (espace tampon). Disposer le système à l'abri du rayonnement solaire pour minimiser les échanges thermiques avec le milieu d'échange.

#### III.10.3.5 Discussion de l'efficacité de l'humidificateur et la consommation d'eau

Il est à noter que l'efficacité moyenne de l'humidificateur utilisé est de 49.05% qui est une valeur très faible par rapport à des humidificateurs de haute qualité du même type, et cela est due à :

- Le calcul de l'efficacité est basé sur les températures sèches avant et après humidification qui sont mesure en décalage dans le temps.
- Les pertes en teneur d'eau par les parois du local.
- L'alimentation du bac de culture par une citerne exposé au soleil ou la température à l'intérieur dépasse les 45 ˚ C
- Les pertes de charge causées par l'état des portes d'accès de l'air
- Les fuites causées par la réalisation elle-même, qui est exécutée par des moyens rudimentaires

La consommation d'eau horaire évolue de manière aléatoire. A titre indicatif, la consommation journaliére est estimée à environ 200 litres qui est une quantité très importante et elle est causé par les diverses pertes en teneur d'eau par le système et le local.

# III.11 Les codes sources utilisés dans l'application

## III.11.1 Calcul de l'enthalpie

```
temps=[10:1:22]
h1 = load(h1.dat)
h2 = load(h2.dat)
xx = 10:.25:22;
        yy = spline(temps,h1,xx);
        zz = spline(temps,h2,xx)
        % plot(temps,h1,'o',xx,yy)
plot(temps,h1,'o',xx,yy,temps,h2,'o',xx,zz)
xlabel('Temps local à Adrar (h)')
ylabel('Enthalpie de l''air du local  (kJ/kg')
title ('Enthalpie')
hleg1 = legend('Avant','après');
grid on
```

## III.11.2 Calcul des températures du local

```
Temps=[10:1:22];
T1 = load(T1.dat);
T2 = load(T2.dat);
Th = load(Th.dat);
Tempsi = [10:0.01:22];
T1i = interp1(Temps,T1,Tempsi);
T1i = interp1(Temps,T1,Tempsi);
T2i = interp1(Temps,T2,Tempsi);
Thi = interp1(Temps,Th,Tempsi);
plot(Temps,T1,'o',Tempsi,T1i,Temps,T2,'o',Tempsi,T2i,Temps,Th,'o',Tempsi,Thi);
xlabel('Temps local à Adrar (h)')
ylabel('Température °C')
title ('variation de la température sèche du local des semaines (26-02)
    /07/95-(02-08)/08/95 ')
hleg1 = legend('Temp sèche avant','Temp sèche après','Temp humide de l''air')
% c = ((T1-T2)./(T1-Th)).*100
grid on
```

## III.11.3 Calcul des humidités relatives du local

```
Temps = [10:1:22];
H1 = load(H1.dat);
H2 = load(H2.dat);
xx = 10:.25:22;
        yy = spline(Temps,H1,xx);
        zz = spline(Temps,H2,xx)
        plot(Temps,H1,'o',xx,yy,Temps,H2,'o',xx,zz)
ylabel('humidité relative du local  (%)')
title ('humidité relative de l''air du local Semaine du (02-08)/08/95')
xlabel('Temps local à Adrar (h)')
hleg1 = legend('Avant humidification','après humidification')
grid on
```

### III.11.4 Calcul des humidités absolues du local

```
Temps=[10:1:22];
x1 = load(x1.dat)
x2 = load(x2.dat)
xx = 10:.25:22;
        yy = spline(Temps,x1,xx);
        zz = spline(Temps,x2,xx)
        plot(Temps,H1,'o',xx,yy,Temps,H2,'o',xx,zz)
xlabel('Temps local à Adrar (h)')
ylabel('humidité absolue de l''air du local')
title ('humidité absolue')
hleg1 = legend('Avant','après')
grid on
```

### III.11.5 Calcul de la charge thermique du local

```
T = [10:1:22];
ql = load(q1.dat);
Ti = [10:0.01:22];
qli = interp1(T,ql,Ti);
plot(T,ql,'o',Ti,qli);
xlabel('Temps local à Adrar (h)')
ylabel('Charge thermique du local (W)')
title ('Variation de la Charge thermique du local en fct du temps')
grid on
```

### III.11.6 Confort thermique

```
% cas d'une personne en activité soutenue (travail lourd sur machine, travail de
% garage) et habillée en tenue de travail
M = 58  % W/m2    métabolisme
W = 0    % W/m2 travail exterieur negligeable
v = 0.4  % vitesse relative de l air
Iv = 0.078 %  m2.k/W  indice de resistance thermique
fv = 1+0.2*Iv % m2.K/W facteur de vetement

% pression partielle de vapeur de l'air ambiant
P0 = 101325 %  P0 étant la pression atmosphérique au niveau de la mer (en Pa)
x1 = load(x1.dat)
x2 = load(x2.dat)
Pv = (0.6221+x1)./(P0*x1)
Pv2 = (0.6221+x2)./(P0*x2)

temps = [10:1:22]
T1 = load(T1.dat) % température sèche du local avant humidification
TETArs = load(TETArs.dat) % température sèche du local après humidification T2
TETAa = load(TETAa.dat) % température de l'air humide après humidification
TETArm = TETArs*(1+sqrt(10*v))-TETAa*sqrt(10*v) % température radiante moyenne des
    parois
TETAsv = 35.7-0.028*(M-W)-0.155*Iv*((M-W)-3.05*10.^-3*(5733-6.99*(M-W)-Pv)
    -0.42*((M-W)-58.15)-1.7*10.^-5*M*(5867-Pv)-0.0014*M*(34-TETAa)) % température
    superficielle moyenne des vêtements
```

```
hc = max(2.38*(TETAsv-TETAa).^0.25 , 12.1*sqrt(v)) % coefficient d'échange par convection

a = 3.05*10.^-3*(5733-6.99*(M-W)-Pv)
b = 0.42*((M-W) -58.15)+1.7*10.^-5*M*(5867-Pv)
c = 0.0014*M*(34-TETAa)
d1 = 3.96*10.^-8*fv*(((TETAsv+273).^4)-((TETArm+273).^4))
d2 = fv*hc
d3 = (TETAsv-TETAa)
d = d1+(d2.*d3)
confort = a+b+c+d

TETArm2 = T1*(1+sqrt(10*v))-TETAa*sqrt(10*v) % température radiante moyenne des parois
TETAsv2 = 35.7-0.028*(M-W) -0.155*Iv*((M-W) -3.05*10.^-3*(5733-6.99*(M-W)-Pv2) -0.42*((M-W) -58.15) -1.7*10.^-5*M*(5867-Pv2) -0.0014*M*(34-TETAa)) % température superficielle moyenne des vêtements
hc = max(2.38*(TETAsv2-TETAa).^0.25 , 12.1*sqrt(v)) % coefficient d'échange par convection
w = 3.05*10.^-3*(5733-6.99*(M-W)-Pv2)
x = 0.42*((M-W) -58.15)+1.7*10.^-5*M*(5867-Pv2)
y = 0.0014*M*(34-TETAa)
z1 = 3.96*10.^-8*fv*(((TETAsv2+273).^4)-((TETArm2+273).^4))
z2 = fv*hc
z3 = (TETAsv2-TETAa)
z = z1+(z2.*z3)
confort2 = w+x+y+z

xx = 10:.25:22;
        yy = spline(temps,confort,xx);
        zz = spline(temps,confort2,xx)

plot(temps,confort,'o',xx,zz,temps,confort2,'o',xx,yy)
xlabel('temps local à Adrar (h)')
ylabel('confort')
title('confort du cas 1 avant et apres humidification')
hleg1 = legend('Avant','après')
grid on
```

# Conclusion

L'approche de modélisation et de caractérisation traitée dans ce mémoire a permis de mieux décrire, comprendre, analyser et établir un modèle fondé sur des bilans énergétiques et des lois de comportement d'échanges de chaleur et de masse du processus de refroidissement adiabatique d'un local en préfabriqué de 150 $m^3$ de volume en période de chaleur. Le local est équipé d'un humidificateur par pulvérisation d'eau de type Saclar conçu pour améliorer le taux de satisfaction sensorielle en matière de confort thermique.

En période estival, sous l'effet de la radiation solaire incidente qui dépasse les 6 $kW/m^2/j$, la température de l'air des locaux (salle de séjour, bureau, cabinet, serre agricole ...) en général et les locaux en préfabriqué en particulier augmente fortement à plus de 50 $^\circ$ C induisant ainsi une forte diminution de l'humidité relative à moins de 5%. Ainsi, un système de conditionnement d'air par pulvérisation d'eau bien conçu permet de moduler correctement les paramètres psychrométriques du mélange air-vapeur du local pour assurer un état de confort thermique adéquat pour la vie humaine.

L'approche de modélisation proposée dans ce mémoire, montre que l'état psychrométrique de l'air du local est relativement amélioré après humidification car il passe de (48.08 $^\circ$ C, 5.48%) à (34.21 $^\circ$ C,temp. de l'air 25 $^\circ$ C et 43.78%). Cependant, le confort thermique du local est nettement amélioré, seulement il reste insuffisant car le Pourcentage prévisibles D'insatisfaits reste loin des normes prescrites. Cela est dû à l'état dégradée du local testé, de l'humidificateur d'air, des instruments de mesure utilisés.

Le modèle semi empirique proposé permet de décrire le confort thermique du local à partir de la liaison de son état psychrométrique avec les paramètres thermiques de comportement des occupants. Ce modèle permet de contribuer à l'optimisation de l'intégrité du système sur le plan technico-économique via le dimensionnement bioclimatique du local, le système de pulvérisation d'eau et la stratégie de commande appropriée.

La connaissance des conditions psychrométrique des locaux permet de connaître les caractéristiques du bâtiment (inertie, isolation...), d'identifier les évolutions critiques et apporter les mesures correctives nécessaires et de faire le choix du matériel adéquat et amélioration des conditions de conservation des produits.

La stabilité des conditions psychrométrique selon des normes prescrites n'est pas seulement un moyen de confort thermqiue, mais aussi une méthode efficace pour conserver la qualité et la durée de vie des produits stockés.

# Index

Humidité, **ix–xiii**, **1, 2**, **4–6**, **9–12**, **14, 15**, **20, 21**, **24–27**, **38, 39**, **41**, **46, 47**

Pulvérisation, **2**, **14–18**, **32, 33**, **43, 44**

Thermique, **ix**, **xi**, **xiii**, **1, 2**, **7–11**, **14**, **20**, **27**, **29**, **35–41**, **43**, **48, 49**, **51, 52**

# Bibliographie


[1] Luftbefeuchtung, *Humidification de l'air*, édit 1972

[2] PNR France : buses et accessoires de pulvérisation depuis 1968. Système d'humidification[en ligne] http://www.pnr-france.fr/site-web/Systeme-d-humidification?lang=fr (consulté le dimanche 12 may 2013).

[3] DUMINIL, Maxime. *Air humide*. Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, 1996, vol. 1, no B2230, p. B2230. 1-B2230. 13.

[4] Thermique du bâtiment, Chap G : Climatisation - Conditionnement d'air [en ligne]http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-spaces/GC/thermique/chapG/0schap/conditionnement.pdf (consulté le 12 septembre 2013).

[5] DIMCLIM Dimensionnement Climatisation, DIMCLIM Conditions de soufflage dans un local [en ligne]http://www.dimclim.fr/conditions-de-soufflage.php (consulté le 20 septembre 2013).

[6] BOUTELOUP, Jacques, LIGEN, Jean, et LE GUAY, Michel. *Climatisation, conditionnement d'air : Traitement de l'air*. Editions parisiennes, 1996.

[7] F. REIMUTH, *Climatisation et conditionnement de l'air modernes par l'exemple (tome1 les calculs)* ; PYC livres éditions ; 1999

[8] J. BOUTELOUP, M. LE GUAY, J LIGEN ; *Climatisation et conditionnement de l'air 4 les systèmes* ; les éditions parisiennes.

[9] Energie+ - conception et rénovation des bâtiments tertiaires. Les humidificateurs à pulvérisation d'eau froide [en ligne]Http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11173 (consulté le 03 octobre 2013).

[10] BAILLY, André, CLERC-RENAUD, Michel, RUTMAN, Emmanuel, et al. *Traitement de l'air et climatisation. Les composants et leurs fonctions*. Techniques de l'ingénieur. génie énergétique, 2001, vol. 5, no BE9271, p. BE9271. 1-BE9271. 28.

[11] CRETINON, Bernard. *Mesure des paramètres de l'air humide*. Technique de l'Ingénieur R, 1995, vol. 3, p. 045.

[12] BAILLY, André, CLERC-RENAUD, Michel, RUTMAN, Emmanuel, et al. *Traitement de l'air et climatisation. Aspects thermiques et mécaniques*. Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, 2001, vol. 5, no BE9272, p. BE9272. 1-BE9272. 22.

[13] JONES, W. P. P. *Air conditioning engineering*. Routledge, 2012.

[14] PORCHER, Gérard. *Cours de climatisation : bases du calcul des installations de climatisation*. Ed. parisiennes-chaud-froid-plomberie, 1993.

[15] LE CHAUFFAGE CENTRAL. BILAN THERMIQUE DE CLIMATISATION (Calcul des charges thermiques estivales)[en ligne]http://www.hbsoft.be/chauffage/bilan_clim.html (consulté le 10 novembre 2013).

[16] Rapport interne de l'URER/MS d'Adrar, 1995.