

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MENTOURI  
CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE,  
DE GEOGRAPHIE ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE  
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

N° d'Ordre.....  
Série.....

**MEMOIRE**

*Pour l'Obtention du Diplôme de Magistère en Architecture*

*Option : Architecture Bioclimatique.*

**THEME :**

***L'IMPACT DE L'ATRIUM SUR LE CONFORT  
THERMIQUE DANS LES BATIMENTS PUBLICS***

*(Cas de la Maison de culture à Jijel)*

Présenté par : M<sup>elle</sup> **RAHAL Samira**

Sous la direction de : **Dr. BOUCHAHM Yasmina**

**Jury d'examen :**

Président : Pr. BOURBIA Fatiha

Université de Constantine

Examineur : Dr. ABDOU Saliha

Université de Constantine

Examineur : Dr. LEZZAR Bouba

Université de Constantine

Rapporteur : Dr. BOUCHAHM Yasmina

Université de Constantine

Soutenu le : 07/07/2011



*Aux....*

*Personnes chères à mon cœur*

*... Mes parents*

## **Remerciements**

*Il serait injuste d'omettre d'adresser des mots de reconnaissance à l'égard de tous ceux qui, sans leur aide et contribution, soutien effectif et moral, pensées et prières, ce travail n'aurait eu aucune chance de voir le jour et prendre cette modeste forme d'initiation à la recherche scientifique.*

*Avant tout, j'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury qui, ont pris le temps d'examiner ce travail et d'avoir accepté de le juger, donnant lieu à une soutenance riche en discussions.*

*J'exprime ma plus vive reconnaissance à Docteur **Yasmina BOUCHAHM** pour avoir dirigé ce travail, pour son soutien, ses encouragements et conseils pertinents. Ce fût un honneur et une immense joie d'avoir été encadré par elle.*

*Que le Professeur **Fatiha BOURBIA**, directrice du laboratoire A.B.E « Architecture Bioclimatique et Environnement », le Docteur **Salih Abdou** et Madame **Garmia NINI** membres du laboratoire, sachant combien je leur suis redevable pour leurs encouragements et conseils tout au long de ma formation. Je voudrai leur témoigner ici toute ma gratitude et mes sincères remerciements.*

*Je tiens tout particulièrement à exprimer mes remerciements aux personnels de la Maison de Culture **OMAR OUSSEDIK** de la ville de Jijel, en particulier Mademoiselle **Nassima FEDSSI**, pour son accueil et aide précieuse, facilitant ainsi le déroulement de la campagne de mesure. Je remercie également le personnel du service météorologique de la station météo de Jijel.*

*Je ne pourrai oublier tous mes amis et mes collègues de la post graduation dont l'aide généreuse de par la documentation ou des appareils de mesures m'a été précieuse.*

## Résumé

Les grands volumes vitrés que sont les atriums, formes répandues auxquelles font appel beaucoup d'architectes dans leurs projets, sont souvent caractérisés par des problèmes thermiques et de circulation d'air, qui peuvent rendre ces espaces impraticables durant l'été. Bien que ces espaces soient attrayants par de nombreux aspects, ils présentent souvent des défauts majeurs qui nuisent au confort des occupants et peuvent provoquer des consommations excessives d'énergie.

L'objectif de ce travail est de déterminer le comportement thermique des espaces atriums sous nos latitudes, et valoriser la ventilation naturelle dans ce dernier comme stratégie passive de rafraîchissement en été, dans l'optique de contribuer à l'amélioration de la conception des atriums adéquats à notre climat méditerranéen. Dans ce contexte une campagne de mesures in situ est élaborée dans l'atrium de la maison de la culture de la ville de Jijel, durant deux périodes estivales et hivernales, où plusieurs scénarios ont fait l'objet d'une étude sur les ambiances thermo-aérodynamiques.

L'interprétation des données récoltées sur les lieux montre que, effectivement en période estivale l'atrium constitue une source d'inconfort à l'intérieur du bâtiment, illustré par une surchauffe excessive et une stratification accentuée en l'absence totale d'un renouvellement d'air par ventilation naturelle, l'incorporation de cette dernière a permis une abaissement des températures d'air et par suite, un rafraîchissement des ambiances internes est senti. Tandis que, en période hivernale l'atrium révèle un aspect bioclimatique, jouant le rôle d'un capteur solaire, régulant ainsi les variations des températures, et rapportant des degrés précieux pour le chauffage de l'espace.

Cette étude s'appuie aussi sur une simulation numérique, dont le modèle étudié dans la partie investigation a servi de support à cette étude menée en utilisant le programme « EDSL TAS program version 9.1.4.2 ». Qui permet d'une part, de vérifier les résultats obtenus par la campagne de mesure. Et d'autre part, valoriser l'aspect rafraîchissant des deux types de ventilation naturelle (transversale et par tirage thermique) à travers plusieurs scénarios. Dont les résultats apparaissent intéressants par rapport au confort thermique résultant de la combinaison entre ces deux types de ventilation naturelle.

**Mots-clés** : Atrium, ambiance thermo-aérodynamique, stratification thermique, ventilation naturelle, simulation numérique.

**Table des matières**

Table des matières ..... I  
 Liste des figures : ..... VI  
 Liste des Tableaux : ..... X  
 Nomenclature : ..... XI

**Introduction générale:**

Introduction ..... 1  
 Problématique : ..... 3  
 Objectifs : ..... 4  
 Hypothèses : ..... 5  
 Méthodologie : ..... 6  
 Structure Du Mémoire : ..... 6

**CHAPITRE I: L'atrium comme forme architecturale**

I.1. Introduction: ..... 9  
 I.2. L'historique des espaces atrium et leurs développements: ..... 10  
     I.2.1. L'atrium traditionnel : ..... 10  
     I.2.2. L'évolution d'une forme traditionnelle et l'apparition des grands espaces vitrés et leurs développements: ..... 12  
     I.2.3. L'atrium moderne: ..... 18  
     I.2.4. Définition de l'atrium moderne: ..... 20  
 I.3. Typologie morphologique des atriums : ..... 22  
     I.3.1. Les typologies existantes : ..... 22  
     I.3.2. Proposition d'une typologie : ..... 25  
         I.3.2.1. Critères de positionnement : ..... 26  
         I.3.2.2. Critères de proportion : ..... 28  
         I.3.2.3. Combinaison des deux critères : ..... 28  
 I.4. Destination des atriums : ..... 29  
     I.4.1. Fonction des atriums : ..... 30  
         I.4.1.1. Sur le plan de l'éclairage naturel : ..... 31  
         I.4.1.2. Sur le plan thermique : ..... 31  
         I.4.1.3. Sur un plan subjectif : ..... 31  
         I.4.1.4. Sur le plan fonctionnel : ..... 32

I.4.2. Organisation interne :	32
I.5. La fonction paradoxale de l'atrium:	33
I.6. L'alternative des concepts pour le design des atriums :	34
I.7. Conclusion :	35

**CHAPITRE II : Caractérisation des ambiances thermiques dans les atriums**

II.1. Introduction :	36
II.2. Spécificités des ambiances thermiques dans les atriums :	36
II.2.1. Spécificités liées au vitrage : l'effet de serre.....	36
II.2.2. Importance des échanges radiatifs :	37
II.2.2.1. Les flux solaires (CLO) :	37
II.2.2.2. Le rayonnement thermique (GLO) :	39
II.2.2.3. Facteurs de forme :	40
II.2.3. Importance des échanges convectifs :	41
II.2.4. Importance de la conduction de la chaleur à travers les parois :	43
II.2.5. La stratification des températures d'air :	44
II.3. Caractérisation de la stratification thermique :	47
II.3.1. La stratification des températures d'air en été :	47
II.3.2. La stratification des températures d'air en hiver :	49
II.3.3. Effets des dimensions de l'atrium sur la stratification :	50
II.3.3.1. Effets de la hauteur :	50
II.3.3.2. Effets de la largeur :	51
II.3.4. Effets de l'organisation interne de l'atrium sur la stratification :	53
II.3.5. Influence d'autres paramètres sur la stratification :	56
II.3.5.1. Influence de la surface vitrée :	57
II.3.5.2. Influence de l'inertie :	58
II.3.5.3. Influence des cavités des murs de l'enveloppe et les matériaux de toiture :	60
II.3.5.4. Influence de l'orientation :	61
II.4. Conclusion :	61

**CHAPITRE III: Caractérisation des ambiances aérauliques dans les atriums**

III.1. Introduction :	63
III.1. Stratégies de ventilation adoptées dans les atriums :	63
III.1.1. La ventilation naturelle :	66

III.1.2. Modèles empiriques employés en ventilation naturelle :	68
III.1.2.1. Méthode d'Andersen :	68
III.1.3. Effet de la ventilation naturelle sur la stratification thermique :	72
III.1.4. Impact de la ventilation nocturne :	74
III.2. Les outils de simulation appliqués aux ambiances thermo-aérauliques dans les atriums :	75
III.2.1. Les méthodes simplifiées :	76
III.2.2. Les modèles multizones :	77
III.2.3. Les modèles zonaux :	79
III.2.3.1. Modèles zonaux bidimensionnels :	80
III.2.3.2. Modèles zonaux tridimensionnels :	81
III.2.4. Les codes CFD (Computational Fluid Dynamics) :	81
III.2.5. Récapitulatif :	83
III.3. Les études menées dans le domaine des ambiances thermo-aérauliques des atriums :	84
III.3.1. Etudes générales menées dans le cadre des atriums :	85
III.3.2. Etudes dédiées aux techniques et aux outils de simulation :	86
III.3.3. Etudes menées dans des atriums existants ou à construire :	88
III.3.4. Etudes paramétriques :	90
III.4. Conclusion :	91

## **CHAPITRE IV: Investigation**

IV.1. Introduction :	93
IV.2. Situation de la ville de Jijel :	93
IV.3. Contexte climatique :	94
IV.4. Analyse climatique de la ville de Jijel :	95
IV.5. Présentation du cas d'étude :	102
IV.6. Objectif de la campagne de mesures :	107
IV.6.1. Paramètres mesurés :	107
IV.6.2. Description de système de mesure :	107
IV.6.3. Méthodologie et déroulement de la campagne de mesures :	109
IV.6.4. Les stations de mesures :	110
IV.7. Interprétation des résultats :	112
IV.7.1. Saison estivale : (été 2009 et 2010) :	112
IV.7.1.1. Analyse des résultats de mesure :	112
IV.7.1.1.1. Les résultats de mesures pour le cas N°1 :	112

IV.1.1.1.1. Les résultats de mesures pour le cas N°2 :	117
IV.7.1.1.2. Les résultats de mesures pour le cas N°3 :	123
IV.7.1.1.3. Evaluation du confort thermique intérieur :	127
IV.7.1.1.4. effet de la ventilation sur la stratification thermique :	132
IV.7.1.1.5. Effet de la ventilation sur le rafraîchissement intérieur :	133
IV.7.1.1.6. L'impact thermique de l'atrium sur les espaces adjacents :	135
IV.7.1.2. Conclusion de l'investigation estivale:	136
IV.7.2. Saison hivernale : (hiver 2010) .....	137
IV.7.2.1. Cas d'une journée sans soleil (Cas N°4):	137
IV.7.2.2. Cas d'une journée ensoleillée (Cas N°5):	139
IV.7.2.3. Comparaison entre les résultats des deux cas (4 et 5):	142
IV.7.2.4. Conclusion de l'investigation hivernale: .....	143
IV.8. Conclusion :	143

## **CHAPITRE V : Simulation du comportement thermique de l'atrium**

V.1. Introduction :	146
V.2. Choix et descriptif de l'outil de simulation:	147
V.3. Structure du programme EDSL Tas :	151
V.4. Objectifs de la simulation :	152
V.5. Démarche de la simulation :	152
V.6. Modèle d'étude :	153
V.7. Les entrées du programme « Tas Building Simulator »:	155
V.7.1. Calendrier :	155
V.7.2. Le fichier météo :	156
V.7.3. Éléments du bâtiment et les constructions :	157
V.7.4. Les conditions internes :	160
V.7.5. Les scénarios :	161
V.7.6. Type d'Apertures :	161
V.8. Résultats et analyses :	164
V.8.1. Confrontation des résultats de simulations à ceux des mesures :	165
V.8.2. Effet de la ventilation naturelle :	166
V.8.2.1. Effet de la ventilation transversale :	166
V.8.2.1.1. Ambiance interne :	166
V.8.2.1.2. Stratification thermique :	167
V.8.2.2. Effet de la ventilation par tirage thermique (effet de cheminée) :	168

---

V.8.2.2.1. Ambiance interne :.....	168
V.8.2.2.2. Stratification thermique :.....	169
V.8.2.1. Comparaison entre l'effet de la ventilation naturelle transversale et celle par tirage thermique (effet de cheminée) :.....	169
V.8.2.2. L'impact de l'ambiance thermique de l'espace atrium sur les espaces adjacents:.....	170
V.8.2.3. L'effet de la ventilation par tirage thermique en fonction des positions des ouvertures:.....	171
V.8.3. simulation des ambiances thermo-aéraulique internes : .....	172
V.9. Conclusion : .....	185
<b>Conclusion générale et perspectives: .....</b>	<b>188</b>
<b>Bibliographie : .....</b>	<b>193</b>
<b>Annexes:</b>	
Annexe A :.....	202
Annexe B :.....	210
Annexe C :.....	223
Annexe D :.....	226
Annexe E :.....	229

**Abstract**

لمـخـص

Liste des figures :

**CHAPITRE I :**

Figure I- 1 : plan et coupe d'une maison de Ur, Mésopotamien .....	10
Figure I- 2 : Coupe d'une maison a Faun, Pompeii .....	11
Figure I- 3 : Plan et coupe d'une maison persane .....	11
Figure I- 4 : Plan, coupe, et façade typique de la conception des maisons magasin en Malaysia et Singapore. ....	12
Figure I- 5 : Crystal palace, 1851 .....	13
Figure I- 6 : la Palm House (serre à palmiers) à Kew, 1848 .....	14
Figure I- 7 : Galleria Vittorio Emanuele, 1867 .....	15
Figure I- 8 : Familistère 1883, coupe sur l'une des cours .....	16
Figure I- 9 : Bradbury Building, 1893.....	17
Figure I- 10 : à gauche le Larkin Building, 1906, à droite le musée de Guggenheim à New York, 1959 .....	17
Figure I- 11 : Hyatt Regency Hotel, Atlanta by John Portman .....	19
Figure I- 12 : le Ford Foundation headquarters building, New York, par Roche et Dinkeloo.....	19
Figure I- 13 : Coupe sur le sunspace de Ciflton Nureseries par Terry Farrell .....	21
Figure I- 14 : Netley Infant School par Comté d'architectes Hampshir utilisant un conservatoire pour le chauffage passif pendant l'hiver, et équipés de lames réglables direct pour éviter la lumière du soleil dans l'espace pendant l'été. ....	21
Figure I- 15 : typologie générale des atriums .....	23
Figure I- 16 : classification établie par Yoshino .....	23
Figure I- 17 : Type des atriums d'après une étude japonaise sur 200 bâtiments a atrium .....	24
Figure I- 18 : typologie des atriums établie par Saxon.....	25
Figure I- 19 : exemples d'atriums accolés : ils présentent 3 à 4 faces vitrées extérieures .....	27
Figure I- 20 : exemple d'atriums semi-encastés : ils ont 1 à 2 faces vitrées extérieures, à dominante verticale.....	27
Figure I- 21 : exemple d'atrium encastré : une seule face vitrée horizontale .....	27
Figure I- 22 : atrium ponctuel (à gauche), atrium linéaire (à droite) .....	28
Figure I- 23 : atrium « accolé linéaire » à 3 et 4 faces vitrées et atrium encastré linéaire .....	29
Figure I- 24 : Type d'activité des imme- uble à atrium d'après l'étude « Atrium Studies Technical Review » de Lomas et Eppel (1994) recensant 2000 bâtiments à atrium au Royaume-Uni .....	29
Figure I- 25 : Catégorie des constructeurs .....	29
Figure I- 26 : Type d'activité des immeubles à atrium au Japon, d'après l'étude japonaise de Yoshino (1995) sur 200 bâtiments à atrium.....	30
Figure I- 27 : à gauche, un atrium lisse. A droite, un atrium alvéolaire .....	33
Figure I- 28 : approche de la conception pour la construction à atrium et l'évolution des influences .....	34

**CHAPITRE II :**

Figure II. 1 : distribution des flux solaires sur les parois internes de l'atrium .....	39
Figure II. 2 : géométrie des facteurs de forme entre deux éléments de surfaces élémentaires. ....	40
Figure II. 3 : représentation des conditions limites de stratification.....	44
Figure II. 4: gradient vertical des températures d'air dans différents cas de figure .....	46
Figure II. 5: configurations des atriums étudiées par Yoshino .....	47

Figure II. 6: gradients verticaux des températures d'air pendant l'été.....	49
Figure II. 7 : gradients verticaux des températures d'air pendant l'hiver .....	50
Figure II. 8 : à gauche, gradients verticaux pour diverses hauteurs dans la galerie alors que la largeur reste constante. A droite, évolution des températures en fonction de la hauteur .....	51
Figure II. 9: à gauche, la comparaison des gradients thermiques en fonction de la température extérieure et du rayonnement solaire. A droite, les pénétrations solaires dans les deux atriums .....	52
Figure II. 10: gradients thermiques verticaux dans les deux atriums .....	53
Figure II. 11: Modèle de projet .....	59

**CHAPITRE III :**

Figure III. 1: stratégies de contrôle des ambiances thermo-aérauliques dans un atrium .....	64
Figure III. 2 : Le modèle utilisé dans les expériences .....	67
Figure III. 3 : images montreront le déplacement de flux d'air .....	67
Figure III. 4 : schéma explicatif concernant la prise en compte de la stratification .....	69
Figure III. 5 : capacité de ventilation en fonction du ratio A1/A2 .....	71
Figure III. 6: à gauche, gradients thermiques verticaux pour les trois atriums en fonction du pourcentage d'ouverture. A droite, taux de renouvellement d'air pour deux vitrages différents .	73
Figure III. 7 : Résultats de la ventilation nocturne (Mai).....	74
Figure III. 8 : Résultats de la ventilation nocturne (Août) .....	74
Figure III. 9 : les différentes discrétisations spatiales utilisées pour le cas les atriums .....	76
Figure III. 10: modélisation d'un grand volume avec un modèle zonal bidimensionnel (Togari et al., 1993).....	80
Figure III. 11 : les différentes stratégies analysées en fonction des positions des ouvertures et de la localisation de la tache solaire.....	88
Figure III. 12: les trois formes d'atrium étudiées .....	90

**CHAPITRE IV :**

Figure IV. 1 : Situation géographique de la ville de Jijel .....	94
Figure IV. 2 : Situation de la ville de Jijel par rapport aux zones climatiques .....	95
Figure IV. 3 : Interprétation des données météorologiques de la ville de Jijel Période 1999-2008 .....	96
Figure IV. 4 : la rose des vents annuelle 1999-2008 .....	99
Figure IV. 5 : la rose des vents mensuelle, période 1988-2007 .....	101
Figure IV. 6 : Situation de la maison de la culture (cas d'étude).....	103
Figure IV. 7 : Maquette et vue sur la maison de la culture .....	103
Figure IV. 8: position de l'atrium cas d'étude.....	104
Figure IV. 9 : les différents niveaux du bâtiment.....	105
Figure IV. 10: vue en coupe de l'atrium.....	106
Figure IV. 11: Verrière décorée, coupole de l'atrium .....	106
Figure IV. 12 : l'emplacement de différentes stations de mesures.....	110
Figure IV. 13 : Les différents Cas mesuré .....	111
Figure IV. 14: les résultats de la température de l'air de la journée du 19 août 2009 .....	113
Figure IV. 15: évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°1).....	113
Figure IV. 16: variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 19 août 2009 (Cas N°1)	115

Figure IV. 17 : évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1 et ST3 (Cas N°1)	116
Figure IV. 18 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air (Cas N°1)	117
Figure IV. 19: les résultats de la température de l'air de la journée du 18 août 2009 (Cas N°2)	118
Figure IV. 20: évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°2)	119
Figure IV. 21 : variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 18 août 2009 (Cas N°2)	120
Figure IV. 22 : évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1 et ST3 (Cas N°2)	121
Figure IV. 23 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air	122
Figure IV. 24 : résultat de la température de l'air de la journée du 5 Août 2010 (Cas N°3)	123
Figure IV. 25 : évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°3)	125
Figure IV. 26 : variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 19 août 2010 (Cas N°3)	126
Figure IV. 27: évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1 et ST3 (Cas N°3)	126
Figure IV. 28 : Comparaison des températures de l'air interne (Cas N°1 & 2) avec les limites de confort pour le mois d'Août (Humphrey)	128
Figure IV. 29 : Comparaison des températures de l'air interne (Cas N°3) avec les limites de confort pour le mois d'Août (Humphrey)	129
Figure IV. 30 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°1)	130
Figure IV. 31 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°2)	131
Figure IV. 32 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°3)	131
Figure IV. 33: les gradients thermiques verticaux des températures d'air	132
Figure IV. 34 : évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST1 dans les deux Cas N°1, et Cas N°2	133
Figure IV. 35 : évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST3 dans les deux Cas N°1, et Cas N°2	134
Figure IV. 36: évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST3 (Cas N°3)	135
Figure IV. 37 : variation de la température de l'air au niveau supérieur (Cas N°3)	136
Figure IV. 38: l'évolution de la température de l'air de la journée de 7 Février 2010	138
Figure IV. 39 : évolution des écarts des températures de l'air	139
Figure IV. 40 : l'évolution de la température de l'air de la journée de 9 Février 2010	140
Figure IV. 41 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air	141
Figure IV. 42 : évolution des écarts des températures de l'air de l'espace atrium au niveau supérieur avec l'extérieur	142
Figure IV. 43 : évolution des écarts des températures de l'air dans les stations ST3, et ST3'' avec l'extérieur dans les deux cas.	143

**CHAPITRE V :**

Figure V. 1 : Représentation schématique des mécanismes de transfert de chaleur dans un bâtiment	148
Figure V. 2 : les trois applications de concepteur Tas	151
Figure V. 3 : Résumé des relations fonctionnelles entre les différents paramètres	152
Figure V. 4 : les différents cas de simulation	153
Figure V. 5 : le model cas d'étude réalisé par Tas 3D modeller	154
Figure V. 6 : les différentes zones de model 3D	155
Figure V. 7 : le calendrier utilisé	156

Figure V. 8 : Fichier climatique, relatif aux jours de l'investigation.....	157
Figure V. 9 : les différents éléments de bâtiment .....	158
Figure V. 10 : les conditions internes appliquées aux différents groupes de zones .....	161
Figure V. 11 : scénario utilisé .....	161
Figure V. 12 : type d'aperture.....	162
Figure V. 13 : Direction des vents et l'effet venturi .....	163
Figure V. 14 : la disposition des ouvertures .....	163
Figure V. 15 : comparaison entre l'évolution des températures d'air dans les différents niveaux de l'espace atrium.....	165
Figure V. 16 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du niveau supérieur de l'atrium du Cas A, et Cas B .....	166
Figure V. 17 : comparaison entre les gradients thermiques dans l'espace atrium de Cas A et B.....	167
Figure V. 18 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du Cas A, et Cas E.....	168
Figure V. 19 : comparaison entre les gradients thermiques dans l'espace atrium de Cas A et E.....	169
Figure V. 20 : évolution de l'écart de la température d'air des deux cas B et E .....	170
Figure V. 21 : comparaison entre l'évolution des températures d'air dans les différents espaces de dernier étage.....	171
Figure V. 22 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du Cas C, et D .....	172
Figure V. 23 : champs des températures correspondants aux situations A et B ainsi que les températures de surfaces .....	174
Figure V. 24 : champs des températures correspondants aux situations C, D et E ainsi que les températures de surfaces .....	175
Figure V. 25 : champs des humidités relatives correspondantes aux situations A et B.....	178
Figure V. 26 : champs des humidités relatives correspondantes aux situations C, D et E.....	179
Figure V. 27 : champs des vitesses de l'air correspondantes aux situations A et B.....	180
Figure V. 28 : champs des vitesses de l'air correspondantes aux situations C, D et E.....	181
Figure V. 29 : champs des PPD correspondantes aux situations A et B.....	183
Figure V. 30 : champs des PPD correspondantes aux situations C, D et E.....	184

**ANNEXES:**

Figure B. 1 : Diagramme psychométrique de GIVONI avec application sur la ville de Jijel.....	215
Figure B. 2 : les isothermes .....	217
Figure B. 3 : Le diagramme thermo-isoplèthes.....	217
Figure D. 1 conditions internes appliquées aux zones de l'atrium .....	226
Figure D. 2 : conditions internes appliquées aux zones des coursives .....	227
Figure D. 3 : conditions internes appliquées aux zones des espaces adjacents.....	228
Figure E. 1:ventilation naturelle à travers deux ouvertures par tirage thermique .....	229
Figure E. 2: différences de pression.....	229

**Liste des Tableaux :**

**CHAPITRE II :**

Tableau II. 1 : coefficients d'échanges convectifs en convection naturelle .....	42
Tableau II. 2 : comparaison entre les gradients verticaux des trois atriums étudiés .....	54
Tableau II. 3 : caractéristiques des parois testées .....	57
Tableau II. 4 : comparaison des amplitudes thermiques pour le cas d'un atrium central, la température minimale étant de 24,4 °C.....	58
Tableau II. 5 : les cas de simulation .....	60

**CHAPITRE IV :**

Tableau IV. 1: les instruments de mesure utilise dans l'investigation .....	108
Tableau IV. 2: hauteurs des stations de mesure .....	110

**CHAPITRE V :**

Tableau V. 1 : les caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisés .....	159
Tableau V. 2 : composition des constructions utilisées .....	160
Tableau V. 3 : Surfaces des ouvertures .....	163
Tableau V. 4 : les conditions appliquées pour le module « AMBIENS » .....	173

**ANNEXES :**

Tableau A. 1 : Données météorologiques de la ville de Jijel (PERIODE de 1999-2008).....	202
Tableau A. 2 : Données de la station météo correspondantes aux jours de l'investigation .....	202
Tableau C. 1 : Correspondances entre les valeurs du PMV et l'échelle de sensation thermique (ASHARE) .....	224
Tableau C. 2 : Les plages de confort définissent par la formule de Humphrey pour la ville de Jijel .....	225
Tableau E. 1 : Equations utilisables pour le cas de ventilation naturelle par tirage thermique avec prise en compte de la stratification .....	238

**Nomenclature :**

a	: Difusivité thermique	[m <sup>2</sup> .s]
A	: Surface totale des ouvrants (A <sub>1</sub> +A <sub>2</sub> )	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>1</sub>	: Surface de l'entrée d'air	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>2</sub>	: Surface de la sortie d'air	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>d1</sub>	: Coefficient de perte de charge de l'ouverture A <sub>1</sub>	
C <sub>a</sub>	: Coefficient d'alvéolarité	
c	: Capacité calorifique massique	[J/kg-1.K-1]
F <sub>i,j</sub>	: Facteur de forme	
h <sub>c</sub>	: Coefficient d'échange par convection	[W.m-2.K-1]
H <sub>1</sub>	: Distance verticale entre le plan neutre et l'ouverture A <sub>1</sub>	[m]
H	: Distance verticale entre A <sub>1</sub> et A <sub>2</sub>	
h <sub>f</sub>	: Coefficient d'échange thermique	
Im	: indice d'aridité.	
K	: Coefficient de conduction thermique de la paroi	[W.m-1.K-1]
P	: précipitations annuelles.	[mm]
P	: Terme de production de ε	
P	: Pression	[Pa]
Q	: Débit volumique traversant une ouverture	
S	: Surface de la paroi,	
T	: température moyenne annuelle.	[°C]
T <sub>paroi</sub>	: Température superficielle de la paroi	[°C]
T <sub>air</sub>	: Température de l'air	[°C]
T <sub>int</sub>	: Température de l'air à l'intérieur d'un local	[°C]
T <sub>ext</sub>	: Température de l'air extérieur	[°C]
T <sub>adj</sub>	: Température dans les espaces adjacents	[°C]
T <sub>a</sub>	: Température de l'air dans l'atrium	[°C]
T <sub>m</sub>	: Température moyenne de l'air intérieur	[°C]
T <sub>1</sub>	: Température d'air en bas de l'atrium	[°C]
T <sub>2</sub>	: Température d'air en haut de l'atrium	[°C]
T <sub>c</sub>	: Température du confort	[°C]
T <sub>o</sub>	: Température moyenne du mois	[°C]
T <sub>sup</sub>	: Température de la limite supérieure de la zone de confort	[°C]
T <sub>inf</sub>	: Température de la limite inférieure de la zone de confort	[°C]

---

$\Delta T_m$	: La différence entre la température moyenne interne et celle de l'extérieur	[°C]
V	: Volume d'air	[m <sup>3</sup> .s]
V <sub>max</sub>	: Volume d'air maximum entrant par A <sub>1</sub>	[m <sup>3</sup> .s]
v	: Vitesse de l'air	[m.s <sup>-1</sup> ]

**Flux :**

$\phi_{GLO}$	: Densité de flux par rayonnement GLO	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\phi_{CLO}$	: Densité de flux par rayonnement CLO	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\phi_{conv}$	: Densité de flux convectif	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\phi_{cond}$	: Densité de flux conductif	[W.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>s</sub>	: Surplus de chaleur	

**Symboles :**

$\sigma$	: Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]
$\varepsilon$	: Emissivité de la surface	
$\varepsilon_s$	: Facteur de stratification thermique	
$\rho$	: La masse volumique de l'air	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\lambda$	: Conductivité thermique	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]



# **Introduction générale**

### **Introduction :**

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. Le but de la conception, de la rénovation et de la construction d'un bâtiment est de réaliser ce microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecture sur l'environnement **[Liébard. A, De Herde. A. 2005]**

La limitation des émissions de gaz à effet de serre est aujourd'hui une préoccupation mondiale en raison des risques liés au changement climatique à l'échelle planétaire. Dans ce cadre, la maîtrise de l'énergie est devenue une composante essentielle de la lutte contre l'effet de serre. Dans le secteur de bâtiment, ceci traduit par des mesures liées à la performance énergétique des bâtiments. Les objectifs de ces mesures sont à la hauteur des enjeux, en raison de l'importance du secteur résidentiel-tertiaire sur la consommation d'énergie [HUMBERT.M 2002]. Notre recherche s'inscrit dans cette logique de maîtrise de l'énergie puisque elle vise à améliorer la conception de grands volumes vitrés non climatisés.

Ces deux dernières décennies, les grands volumes vitrés ont été l'objet d'un véritable engouement. Les atriums, formes architecturales faisant partie de la famille des grands volumes vitrés, sont actuellement de plus en plus utilisés dans la production architecturale. Le regain d'intérêt qu'ont les architectes pour ces espaces se traduit par le fait qu'ils les introduisent dans diverses catégories de bâtiments, ils ouvrent virtuellement le bâtiment sur l'extérieur, tout en protégeant les occupants des intempéries, ils sont très appréciés par les architectes pour des raisons esthétiques, mais aussi en raison des symboles qu'ils peuvent véhiculer à travers la transparence et la prouesse technologique. Du point de vue architectural, cela est certainement lié à la volonté d'incorporer un élément fort pouvant participer, par son esthétique, à la bonne image d'un édifice. Les occupants perçoivent positivement ces espaces, par exemple, grâce à la pénétration de la lumière naturelle ou à la fonction sociale de rencontre et de détente. Les promoteurs sont aussi sensibles à la valeur ajoutée qu'ils confèrent au bâtiment. En revanche, l'introduction d'un atrium dans un bâtiment a nécessairement des conséquences sur la qualité des ambiances. Il est alors nécessaire de se soucier, lors de la conception, des problèmes thermiques, de mouvements d'air, de dispersion des polluants, d'éclairage et même d'acoustique.

Cependant, malgré les progrès technologiques réalisés depuis une vingtaine d'années (notamment, sur les propriétés thermiques et optiques des vitrages), on constate très souvent des défauts majeurs dans les grands espaces vitrés qui nuisent au confort des occupants et entraînent des gaspillages d'énergie considérables. En particulier, les phénomènes de surchauffe sont fréquents en période estivale. En outre, la lutte contre les surchauffes excessives passe rarement par des stratégies adéquates de limitation des gains solaires. De telles impasses rendent difficile le maintien de conditions de confort thermique acceptable, même au prix d'une consommation d'énergie de climatisation excessive.

Ces problèmes trouvent souvent leur origine dans le processus de construction, que ce soit au niveau de sa conception à proprement dit, créative et technique, ou au niveau du déroulement du projet architectural et de sa construction. Comme dans tout projet, la construction d'un grand volume vitré est soumise aux aléas économiques, à l'erreur humaine et à la pression du temps [Martin 2000].

La particularité des atriums réside dans le fait qu'ils se différencient des autres espaces par leur grande taille et surtout par leur importante surface vitrée zénithale. L'été, cette dernière permet des apports solaires significatifs qui sont fréquemment la cause de contraintes thermiques pouvant générer des surchauffes qui souvent sont accompagnées de la stratification des températures d'air. Ces problèmes sont assez connus, cependant le contrôle de l'ambiance climatique échappe souvent aux concepteurs [Belmaaziz, 2003].

Toutefois, ces difficultés ne doivent pas occulter les problèmes dus à la méconnaissance des phénomènes physiques en jeu. A cet effet, la complexité du comportement thermo-aérodynamique des grands volumes vitrés, demeure à notre sens, un frein majeur à leur bonne conception en particulier sur le plan de la maîtrise de l'énergie et du confort.

Si du point de vue de la conception, l'esthétique peut être associée au travail de création de l'architecte et donc au savoir architectural, les ambiances thermo-aérodynamiques quant à elles dépendent du caractère instable des phénomènes climatiques extérieurs. Disons pour résumer, qu'un architecte tend à concevoir un « bel » atrium mais n'est pas en mesure de prédire son comportement parce qu'il n'est pas formé pour cela et surtout parce que les moyens qui lui sont offerts pour prédire son comportement ne sont pas adaptés. Or, pour que la conception d'un atrium soit réussie et que celui-ci soit pleinement apprécié par les usagers, il est nécessaire que l'ambiance climatique soit maîtrisée. Dans ce sens, la prise

en compte de cet aspect dans l'acte de bâtir va de soi puisque l'architecte se doit de concevoir une ambiance thermiquement confortable. Cela peut être aussi vu sous l'angle de l'économie d'énergie. Il est établi qu'un atrium est sujet à des consommations énergétiques plus élevées par rapport à un espace classique. Il est nécessaire alors de garantir une ambiance confortable tout en veillant à ce que l'atrium soit performant au niveau énergétique. Pour englober les deux concepts, nous pouvons aussi parler de la haute qualité environnementale du projet (HQE). Au nom de ce concept, l'atrium doit assurer une qualité d'ambiance optimale.

### **Problématique :**

Les nouveaux modèles architecturaux produits, qu'on appelle « construction moderne » sont de plus en plus inadaptées et gros consommateurs d'énergie. Souvent, ces constructions négligent les aspects climatiques, dans l'importance ne paraît pas aux yeux des propriétaires ni même du concepteur dans les premières étapes de projet pour pallier à ce problème d'inconfort, on a souvent recours à des dépenses supplémentaires en matière d'énergie soit pour chauffer, ou climatiser.

L'atrium c'est un espace impressionnant, il met en vie l'espace intérieur par l'admission de la lumière du jour, profite des gains solaires directs en hiver, accroît les interactions et la socialisation des gens. Il agit comme un filtre des effets indésirables des facteurs d'environnement extérieur, tels que la pluie, la neige ou le vent, et en conserve les effets souhaités de plein air tel que le soleil, l'air frais et le confort visuel. Le potentiel d'économie d'énergie d'un atrium est associé à la disposition de la lumière du jour dans les espaces occupés, formant une zone tampon entre l'intérieur et l'extérieur [Göçer et al.2006].

En dépit de ces avantages, de grandes surfaces de vitrage atrium engendrent des contraintes, gain excessives de chaleur solaire en été, et la perte de chaleur en hiver et aussi la stratification de l'air en particulier en été qui ont une incidence sur le confort des usagers, et la performance énergétique des bâtiments atrium.

Parmi les nombreux problèmes que l'architecte est sensé de gérer au tout début du projet, particulièrement lorsqu'il conçoit un atrium, se trouvent ceux qui sont directement liés à la forme et aux aspects constructifs du volume. Il est bien entendu que l'esthétique de la forme occupe une importance capitale dans le travail de conception surtout lorsque qu'on sait que l'atrium doit véhiculer une image de prestige de l'édifice. Ces considérations ne sont pas l'objet de nos investigations. Nous cherchons plutôt à établir

les rapports qui existent entre des paramètres facilement identifiables et le comportement thermique de l'atrium spécialement pendant la saison chaude.

La conception des atriums doit prendre en compte plusieurs paramètres tels que l'orientation, les proportions, l'inertie thermique, le taux de renouvellement d'air,...etc. A ces paramètres s'ajoute le taux de la surface vitrée zénithale, Si la couverture souvent vitrée de ces espaces permet la protection des occupants des intempéries et la diffusion de la lumière naturelle, elle cause des contraintes thermiques principalement solaires qui peuvent provoquer des surchauffes préjudiciables pour le confort des usagers pendant la saison d'été.

Dans un espace grand comme un atrium, L'environnement intérieur est fortement touché par les radiations solaires. Ainsi que l'air étant souvent le vecteur principal d'énergie ou de pollution dans les bâtiments, les transferts aérauliques à l'intérieur vont souvent conditionner la gestion énergétique réelle de celui-ci, mais aussi la qualité de l'air et le confort des occupants. Au cours de la saison d'été, en particulier dans les basses et les régions de latitude moyenne, l'énergie des radiations solaires peuvent causer plusieurs problèmes tels que la surchauffe. L'environnement thermique dans un atrium est caractérisé par une force de flottabilité combinée à l'importante hauteur de plafond de l'espace, et un grand dynamisme généré par la chaleur solaire. Et cela peut donner des températures élevées et une stratification thermique qui sont difficiles à contrôler. Les transferts aérauliques jouent un rôle essentiel. Dans toutes ces interactions des différents phénomènes thermo-aéraulique généré par l'aspect conceptuel de l'espace atrium **qu'elle sera l'environnement thermique dans l'espace atrium sous notre climat méditerranéen? Comment améliorer le confort interne de ces espaces en période d'été par la ventilation naturelle comme stratégie passive de rafraichissement, on améliorant ainsi leur performance énergétique ?**

### **Objectifs :**

L'objectif principal visé dans le cadre de ce travail, est de déterminer le comportement thermique de l'espace atrium dans les deux périodes hivernale et estivale sous notre climat méditerranéen, dans le but d'une amélioration des conditions de confort de l'espace lui-même et par suite de ces espaces adjacents, et de faire de son volume vitré un élément architectural de valeur pour l'année entière, et l'obtention également d'un niveau de confort thermique convenable, en ayant une économie énergétique optimale.

Par rapport à l'amélioration du confort thermique tout en assurant une économie d'énergie, les préoccupations sont liées à la ventilation naturelle en été pour remédier aux surchauffes en période estivale comme stratégie passive de rafraîchissement favorisé par le grand volume de l'espace. Nombre de fins sont visées par cette étude :

- ❖ Adaptation de cette forme architecturale dans le climat méditerranéen, en le concevant sur la base des principes de la bioclimatique, et des caractéristiques climatiques de la région.
- ❖ Etant bien conçue, l'atrium est une solution du développement durable. Il peut créer une contribution très significative aux économies d'énergie dans le bâtiment qui le contient. Etant à la fois espace intérieur et extérieur, il approvisionne le bâtiment en air et en lumière naturelle, favorise un certain bien être de se trouver à proximité de la nature.
- ❖ Porter une solution pour de nouveaux projets, et définir les paramètres de base pour une conception optimale des espaces atrium dans la région étudiée.

### **Hypothèses :**

L'hypothèse de la recherche est que le grand volume, et la toiture vitrée de l'atrium est à l'origine d'un confort diurne en hiver, et un inconfort thermique en été, mais avec l'adaptation d'une stratégie passive contrôlable pour un rafraîchissement d'été, on introduisant une ventilation naturelle durant la période estivale pour lutter contre les surchauffes et la stratification thermique. L'architecture peut trouver ainsi une réponse à une perspective de développement durable. Trois hypothèses sont à vérifier :

- ✓ L'espace atrium est un espace tampon favorisant le confort en période hivernale.
- ✓ L'espace atrium provoque une source de surchauffe localisé dans les niveaux supérieurs, et un inconfort en été.
- ✓ Le grand volume de l'espace atrium favorise une stratification thermique accentué, et par suite un inconfort est ainsi senti dans le niveau supérieur.
- ✓ Certaine optimisation du besoin correspondant à la ventilation naturelle nécessaire qui est générée par l'effet de cheminée, et qui peut être considérée comme un outil

bioclimatique important pour contrôler les températures intérieures et pour améliorer le confort aussi bien que les autres facteurs.

### **Méthodologie :**

La méthodologie suivie pour vérifier les hypothèses émises, et atteindre les objectifs tracés repose sur deux outils de recherche ; « l'investigation » à travers les mesures in situ, et « la simulation » par un programme informatique.

L'investigation va se tenir sur deux périodes représentatives de la saison froide et chaude, afin d'examiner :

- ✓ Le comportement thermique de l'espace atrium dans le climat étudié, à travers la prise de mesures et l'évaluation des données paramétrique de l'ambiance thermique enregistrées à l'intérieur de l'espace atrium.
- ✓ la surchauffe provoquée par la grande surface vitrée en été.
- ✓ l'effet de la stratification thermique sur le confort interne dans ce grand espace,
- ✓ l'effet de la ventilation naturelle sur la distribution verticale de la température, et le rafraîchissement en été.

La simulation aura pour rôle de choisir les solutions permettant d'obtenir le confort pendant la saison estivale. À travers : Certaine optimisation au niveau des ouvertures au niveau de la toiture vitrés afin de générée une ventilation naturelle adéquate pour remédier aux surchauffes, et à la stratification thermique dans l'espace atrium durant la période d'été.

### **Structure Du Mémoire :**

De manière à apporter les éléments de réponse à la problématique posée précédemment ce mémoire s'organise en générale autour de deux parties. La première présente un support théorique, et la seconde le volet pratique.

Une analyse exploratoire sur les ambiances thermo-aérauliques concernant les atriums en général constitue la première partie. Dans le chapitre intitulé «L'atrium comme forme architecturale», nous étudions, après un bref aperçu historique sur l'évolution des grands espaces vitrés, les caractéristiques typo-morphologiques des atriums existants. Nous nous

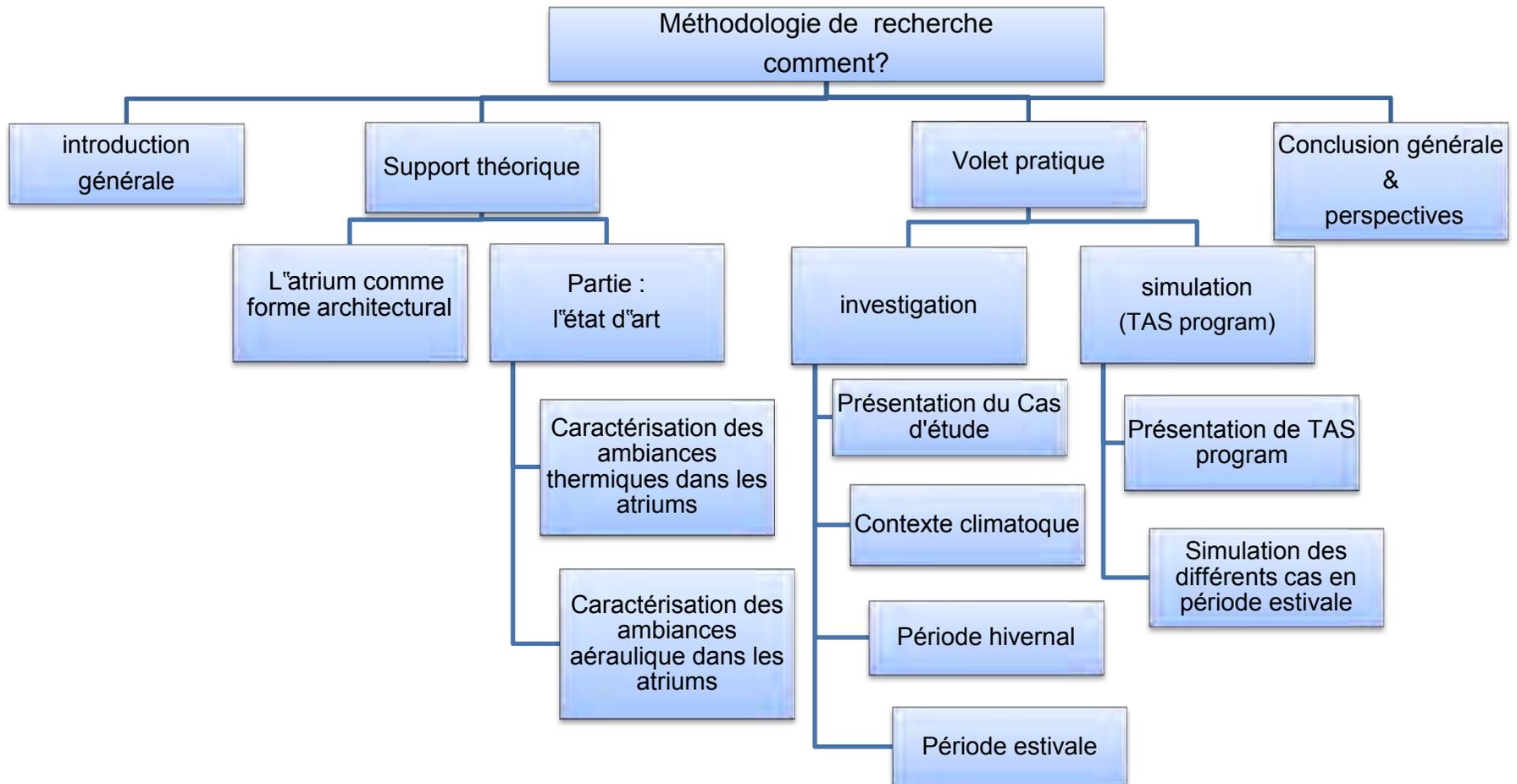
intéressons ensuite aux aspects fonctionnels que peuvent remplir les atriums et qui font qu'ils sont si prisés par les architectes.

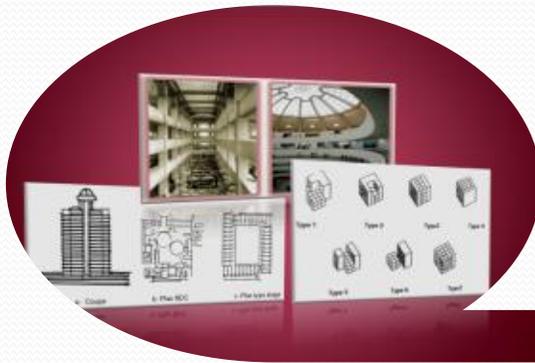
Dans le chapitre suivant «Caractérisation des ambiances thermiques dans les atriums», il s'agit en premier lieu d'un travail bibliographique visant à comprendre en quoi les ambiances climatiques des atriums sont spécifiques par rapport aux autres espaces. Nous décrivons ensuite les phénomènes de transfert de chaleur entrant en ligne de compte dans la modélisation du comportement thermique. Nous nous attardons par la suite sur la description de la stratification thermique en tentant de dégager, à travers des études menées sur des atriums, les paramètres constructifs pouvant avoir un impact sur les surchauffes et en particulier sur la stratification. La ventilation étant un moyen permettant le contrôle du comportement thermique, nous poursuivons cette analyse exploratoire en étudiant les stratégies de ventilation adoptées dans les atriums. Celle-ci est illustrée dans le chapitre intitulé «Caractérisation des ambiances aéraulique dans les atriums» qui sera suivie par la description des différents outils appliqués à la simulation dans les grands volumes. Afin de montrer les différents objectifs que suscite l'analyse du comportement, nous terminons enfin par répertorier toutes les études rencontrées ayant trait avec des aspects proches de ceux que nous étudions.

Pour étudier le comportement thermo-aéraulique d'un atrium soumis à des conditions climatiques sous nos latitudes, nous réservons le chapitre intitulé « investigation » à l'analyse des résultats de la campagne de mesures que nous avons menée dans un atrium construit durant les deux période hivernale et estivale. Afin de prédire le comportement aéraulique en présence d'une ventilation naturelle, et l'effet rafraichissant de celle-ci sur les surchauffes et la stratification thermique dans l'espace atrium durant la période estivale, on fait recours à la simulation numérique par le logiciel de modélisation dynamique de bâtiment « EDSL TAS program version 9.1.4.2», l'analyse des résultats est présentée dans le chapitre « simulation ».

Une récapitulation générale englobe les conclusions pertinentes recueillies lors des différents chapitres qui constituent une base pour des recommandations présentés à la fin dans « conclusion générale et recommandations »

Figure 1: Organigramme de la méthodologie de recherche





**...l'atrium comme  
forme architecturale**

## I.1. Introduction:

Ce que l'on désigne par espace vitré de grande dimension ou plus particulièrement aujourd'hui par le terme d'« atrium » a fait et continue de faire l'objet d'un intérêt particulier dans le monde de l'architecture. Nous pouvons nous en rendre compte à travers les nombreux ouvrages et écrits consacrés à ce sujet [Bednar 1986, Saxon 1996, Bryn 1995].

L'intérêt que portent les architectes pour ce genre d'espace n'est pas anodin. Il est alimenté par un enthousiasme lié à une certaine nostalgie du passé. Cela se traduit par la renaissance de ces espaces dans le paysage architectural d'aujourd'hui comme nous pouvons le constater à travers leurs formes si diverses et si nombreuses. A cela il faut ajouter tous les effets bénéfiques que peuvent apporter ces espaces aux bâtiments au niveau du fonctionnement. En parallèle, mais sur le plan des ambiances et plus précisément celui des conséquences climatiques, cet engouement est accompagné d'un souci relatif aux conditions de confort intérieur qu'un atrium peut engendrer. Il est en effet nécessaire de maîtriser les paramètres physiques qui les régissent. Mais avant d'aborder les aspects d'ordre technique, il est important de s'attarder sur :

- l'évolution des espaces vitrés à travers l'histoire de l'architecture afin de situer les conditions d'émergence de l'atrium actuel,
- l'analyse des espaces largement vitrés par la classification des diverses formes existantes. L'objectif recherché à travers une analyse typo-morphologique consiste à définir les différents archétypes des atriums actuellement édifiés,
- le rôle que joue un atrium aujourd'hui du point de vue des ambiances et du fonctionnement du bâtiment.

Ces trois points nous aideront à mieux cerner les divers aspects architecturaux qu'il est nécessaire de présenter dans l'optique d'une analyse des ambiances thermo-aérauliques qui constituera par la suite l'essentiel de nos propos.

Dans l'architecture moderne, un atrium (pluriel atriums) est un grand espace souvent ouvert, sur plusieurs étages en hauteur avec un toit vitré ou des grandes fenêtres, souvent situé dans un immeuble de bureaux et généralement situés immédiatement au-delà des principales portes d'entrée.

L'atrium c'est une forme qui a évolué d'une simple idée traditionnelle très complexe en solution au problème de fournir un abri à la cour.

## I.2. L'historique des espaces atrium et leurs développements:

### I.2.1. L'atrium traditionnel :

La forme traditionnelle atrium remonte à 3000 ans avant JC dans les vestiges archéologiques d'une cour d'une maison à Ur, en Mésopotamie [Bednar, 1986] comme il est montré dans la (Figure I-1) et plus tard dans les cours centrale des maisons romaine et grecque, la (Figure I-2) montre une section d'une maison de Pompéi montre deux types d'atriums, Tuscan et Tetrastyle. Dans ces bâtiments l'atrium est à la fois un modificateur de climat et un dispositif donne une fonction sociale à l'espace. Les cours dans les climats chauds et chaleureux sont caractérisés par ces fonctions duelles. La (Figure I-3) montre un exemple de maison persane qui montre l'utilisation de la cour et de badgir dans les régions tropicales d'Asie du Sud-est la conception de "shop house" qui utilise une cour intérieure de cette manière. Ces maisons boutique illustrée à la (Figure I-4), largement construite pendant l'ère coloniale, se trouvent principalement dans les zones urbaines denses du détroit établissements de la Péninsule de Malaisie et de Singapour. Il est généralement prévu pour une activité commerciale ou juste au niveau de rez-de-chaussée, avec des logements à l'étage supérieur [Hamdan, Rasdi, 2002].

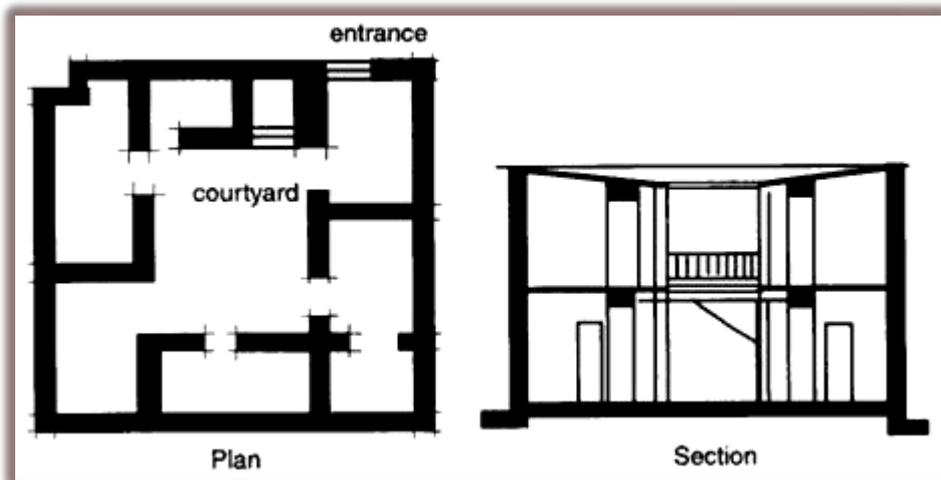


Figure I- 1 : plan et coupe d'une maison de Ur, Mésopotamien

[Source : Hamdan, Rasdi, 2002].

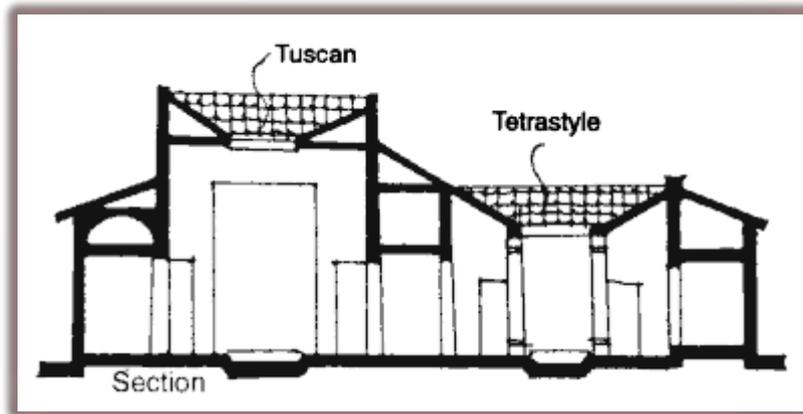


Figure I- 2 : Coupe d'une maison a Faun, Pompeii

[Source : Hamdan, Rasdi, 2002].

La cour de la maison magasin, parfois référée trop comme mur airé, permettent la ventilation naturelle et la pénétration de la lumière dans le centre des bâtiments autrement a plan étroits et souvent profonds. Quelques maisons de magasin sont si profondes qu'elles exigent trois cours [Hamdan, Rasdi, 2002].

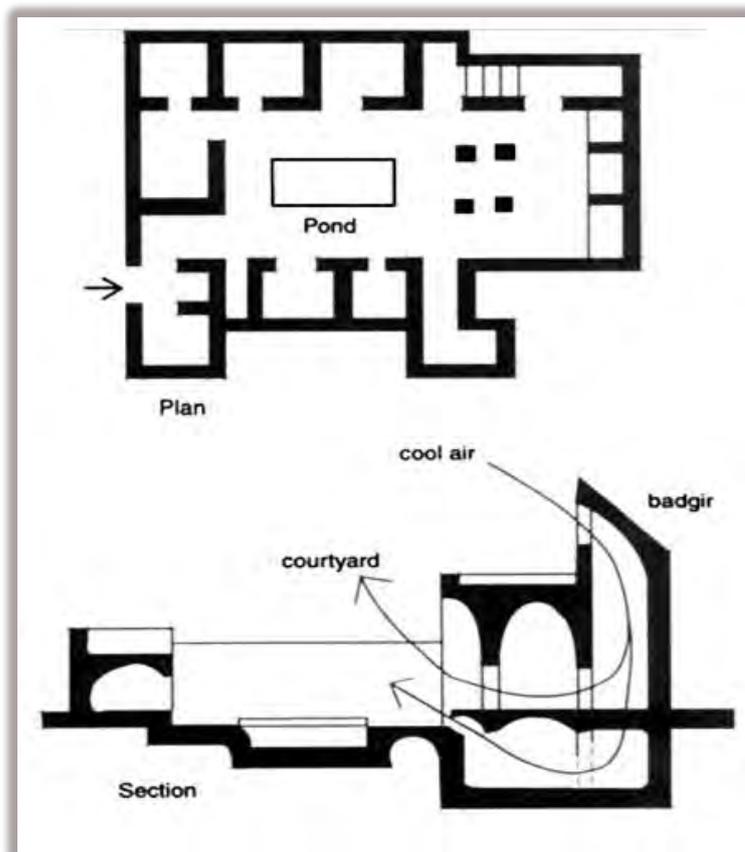
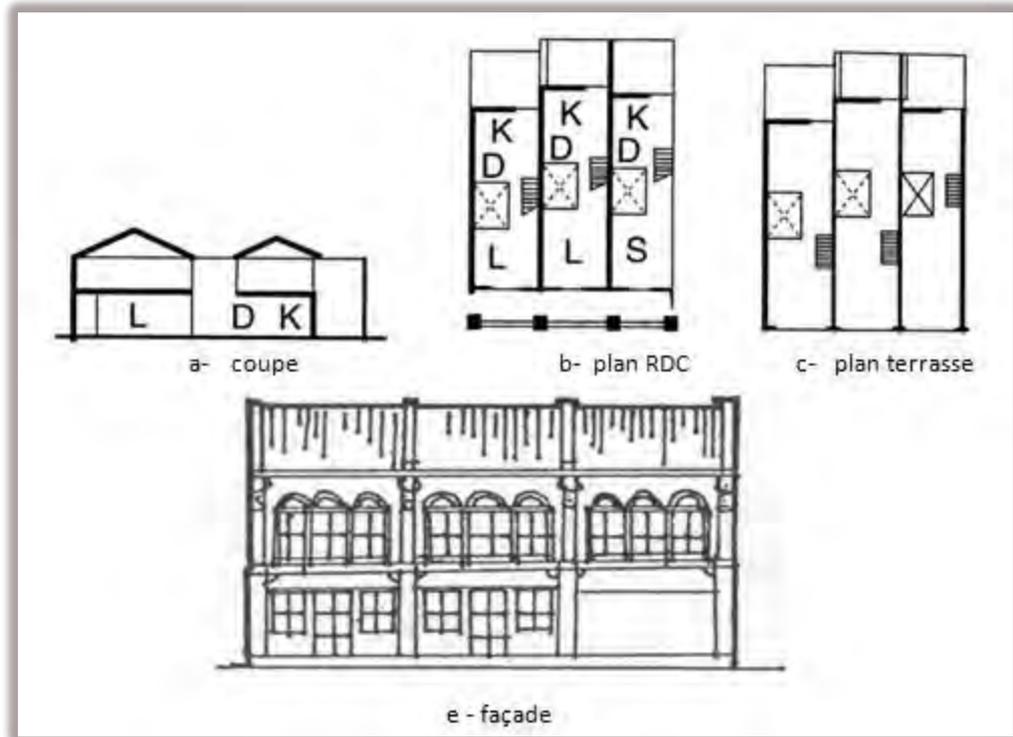


Figure I- 3 : Plan et coupe d'une maison persane

[Source : Hamdan, Rasdi, 2002].



**Figure I- 4 : Plan, coupe, et façade typique de la conception des maisons magasin en Malaysia et Singapore.**

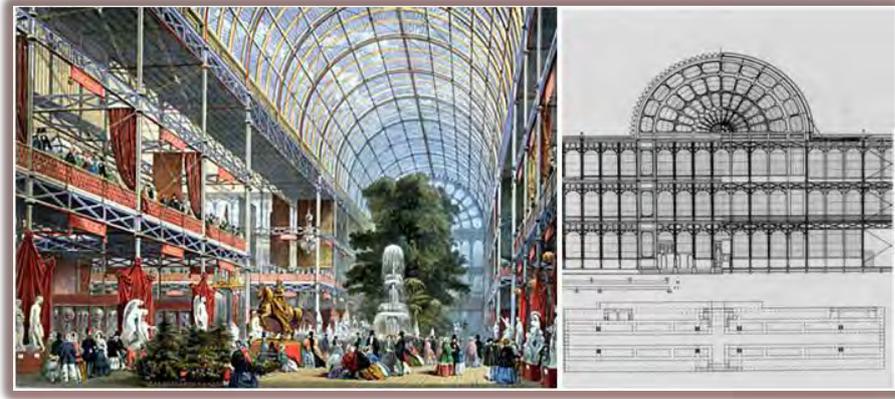
[Source : Hamdan, Rasdi, 2002].

### **I.2.2. L'évolution d'une forme traditionnelle et l'apparition des grands espaces vitrés et leurs développements:**

Si nous nous intéressons au développement des espaces vitrés de grandes dimensions c'est parce que leur évolution est indissociable de celle des atriums ou plus généralement des espaces dont le toit est vitré. Pour cette raison, nous dressons dans ce qui suit un bref aperçu historique traçant les importantes étapes qui ont permis l'avènement de ce type d'espaces.

L'essor des grands espaces vitrés remonte au XIXème siècle, période pendant laquelle les industries du verre et du fer ont connu d'importants développements. La révolution industrielle a ainsi permis l'apparition des structures métalliques de portées de plus en plus grandes. Associées au vitrage modulaire, les colonnes en fonte et les rails en fer forgé sont devenus la technique normalisée de préfabrication rapide et donnèrent naissance à d'innombrables édifices. C'est l'épopée des espaces verriers à l'image des serres botaniques, des terminus de chemin de fer, des passages couverts et des espaces publics.

Le Cristal Palace construit par J. Paxton en 1851 à l'occasion de l'exposition universelle de Londres est sans doute l'édifice qui témoigne le mieux du mariage du fer et du verre (Figure I-5). Entièrement vitré, ce bâtiment aux dimensions considérables (124 par 536 m) fut édifié en moins d'une année grâce à la prouesse technologique du moment [Belmaaziz, 2003]



**Figure I- 5 : Crystal palace, 1851**

[Source : [www.ge35.dial.pipex.com](http://www.ge35.dial.pipex.com) ; [www.commonswikimedia.org](http://www.commonswikimedia.org) ; 2009]

A cette époque, les constructions mêlant le fer et le verre étaient rares. On utilisait plutôt le fer et la brique. Le verre quant à lui ne servait qu'aux fenêtres ou aux coupoles pour assurer un éclairage minimum. Avant 1850, les seules constructions en verre sont les serres. Celles-ci ont connu un réel succès auprès des classes aisées à partir de 1820 et jusqu'en 1870 [Bryn 1995]. Parmi les nombreuses serres édifiées durant cette période citons l'exemple de la serre « Palm House » (Figure I-6) construite par l'ingénieur anglais Richard Turner en collaboration avec l'architecte Decimus Berton entre 1846 et 1848 à Kew dans la banlieue de Londres [Hix 1974]. Il est important de préciser au passage que John Claudius Loudon, botaniste anglais, eu une grande influence sur le développement des serres. Il préconisa l'utilisation du verre et du fer pour leurs constructions. Il fut l'auteur de plusieurs études sur les différentes options techniques à mettre en œuvre pour optimiser l'utilisation des serres en verre comme par exemple la pente du vitrage et l'orientation à utiliser ainsi que les systèmes de chauffage et de contrôle solaire à adopter.

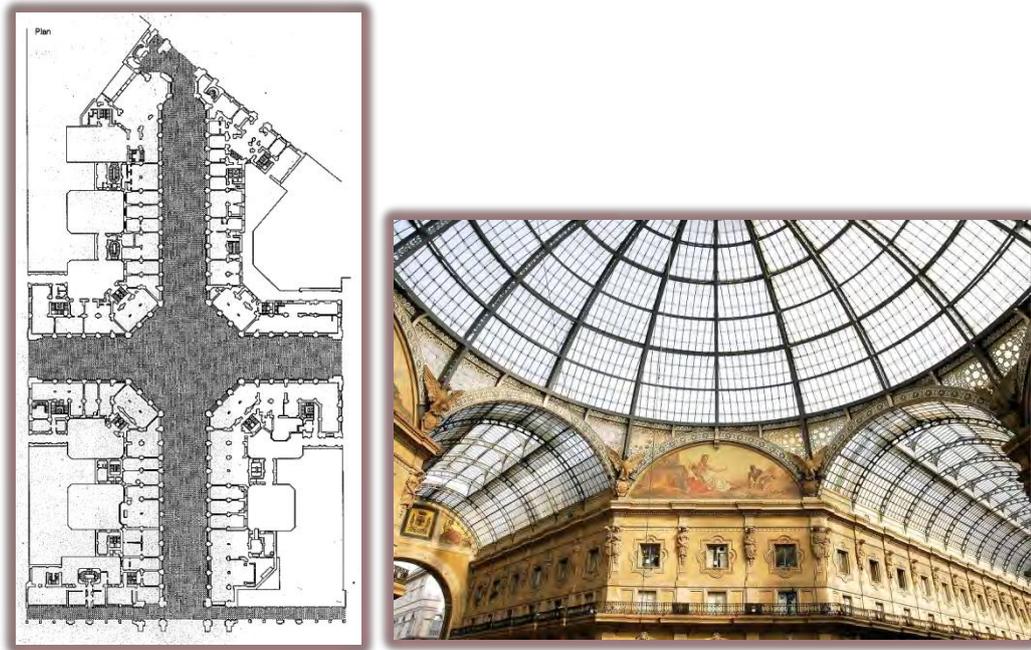


**Figure I- 6 : la Palm House (serre à palmiers) à Kew, 1848**

[Source: [www.y2u.co.uk](http://www.y2u.co.uk) ; [www.golondon.about.com](http://www.golondon.about.com) ; 2009]

Le Cristal Palace fut étroitement lié aux modes de construction des serres, qui sont considérées comme des édifices précurseurs de l'architecture de verre. D'ailleurs, Paxton, qui n'était pas architecte de formation, a dû puiser dans son expérience antérieure, acquise en construisant des serres en verre, pour déterminer les grands traits de ce bâtiment. En effet, de taille plus grande que les serres, il s'en était fortement inspiré puisque son ossature en fer supportait les panneaux vitrés. Cela permettait d'introduire la lumière naturelle en l'absence de l'éclairage électrique. Les préoccupations liées à la ventilation furent aussi intégrées dans la conception. Pour ce faire, Paxton prévint des panneaux en verre coulissants et d'autres pouvant se soulever afin de permettre le renouvellement d'air.

Ce bâtiment, à la fois imposant par sa taille et léger de par les matériaux employés, marqua de son empreinte les édifices de l'époque. Son architecture révolutionnaire est indéniablement le signe d'un renouveau architectural. Bien d'autres réalisations dans d'autres pays seront conçues par la suite en adoptant des techniques de construction semblables. La gare de Kings Cross station (1854), la bibliothèque nationale de Paris (1868) et la gare d'Orsay (1900) sont autant d'exemples qui en témoignent. C'est aussi le cas des passages couverts (ou galeries couvertes) qui existaient bien avant la construction du Cristal Palace comme la galerie d'Orléans (1829) [Geist 1989] même s'il faut reconnaître que le succès de ces espaces tenait aux verrières. Les galeries connurent une importante évolution des dimensions spatiales et une tendance au surdimensionnement à l'exemple de la Galleria Vittorio Emanuele (1867) construite à Milan par Giuseppe Mengoni. Le gigantisme de cette galerie force l'admiration. En effet, cet édifice se présente sous la forme de deux galeries qui se croisent dont la hauteur sous verrière est de 29 m. Un dôme de 39 m de diamètre et de 42 m de hauteur couvre la place octogonale formée par leur intersection (Figure I-7).



**Figure I- 7 : Galleria Vittorio Emanuele, 1867**

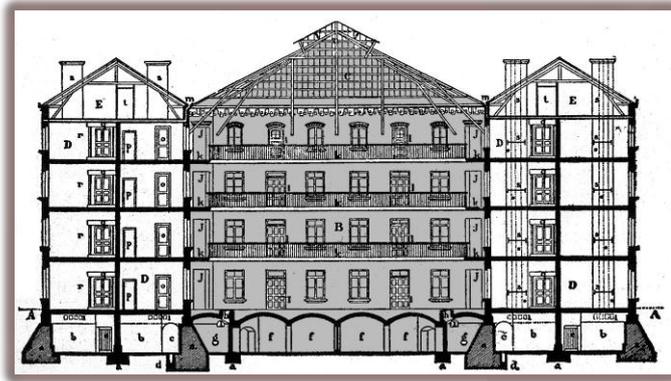
[Source: [www.fr.locr.com](http://www.fr.locr.com) ; 2009]

Après une importante évolution au XIX<sup>ème</sup> siècle (période victorienne), les passages couverts connurent leur déclin au début du XX<sup>ème</sup> siècle. En effet, ce concept architectural ne répondait plus aux nouvelles conditions économiques, techniques et sociales. A ce sujet Geist écrit :

*« Le passage connaît avant la Première Guerre mondiale une mort quasiment officielle. Aucune police des bâtiments ne l'accepterait plus sous la forme du XIX<sup>ème</sup> siècle - j'en ai moi-même fait une fois l'expérience -, aucun capitaine des pompiers ne pourrait un seul instant oublier ses catégories si patiemment élaborées - caissons coupe-feu, dégagement de fumée et cage d'escalier pare-feu - au vu d'un tel passage, aucune inspection des bâtiments ne permettait une exploitation de ce genre. Le passage a quelque chose de suspect, qui ne peut être défini dans aucun arrêté, que l'on ne retrouve plus dans aucune directive. Il n peut donc tout simplement plus exister. » [Geist 1989]*

Nous quittons à présent cette brève histoire de l'évolution des passages pour nous intéresser à l'atrium qui est un autre archétype de l'espace vitré de grande dimension. Au-delà de leur raison commerciale, les passages couverts ont suscité un imaginaire social qui a alimenté des utopies sociales. C'est le cas du « phalanstère », forme de passage destiné exclusivement à l'habitation, imaginé par Fourier. Resté utopique, ce concept séduira plus tard l'industriel Godin pour réaliser le « familistère » (construit entre 1859 à 1883) qui lui est une forme d'habitat social de moindre taille destiné à des ouvriers. Notons qu'à l'époque l'industrie massive a conduit à la surpopulation des villes par l'émergence d'une classe

ouvrière qu'il fallait loger. Si nous avons choisi volontairement de présenter cet édifice parmi d'autres programmes qui transposent le concept du passage c'est parce qu'en plus de cela ce bâtiment comporte une autre variante de l'espace zénithalement vitré qu'il est important de mettre au jour. Il s'agit d'un atrium central au sens strict du terme. En effet, cet édifice d'habitation unitaire se compose de trois parallélogrammes reliés par des passages. Identiques d'aspect, ces ailles sont construites autour de trois cours totalement vitrées de 40 x 17 m comme le montre la figure suivante (Figure I-8).



**Figure I- 8 : Familistère 1883, coupe sur l'une des cours**

[Source : Geist 1989]

A l'image de la cour du familistère que nous venons de voir, le « Bradbury Building » construit en 1893 par George Wyman à Los Angeles est un autre exemple de bâtiments connus comportant une cour vitrée (atrium central totalement vitré) édifié au XIX<sup>ème</sup> siècle (Figure I-9). Des cages d'escalier et deux ascenseurs desservent des coursives se trouvant à chaque étage et parcourant tous les côtés de l'atrium. Ce système de desserte permet d'animer la cour intérieure de cet immeuble de bureaux qui, à l'époque de sa construction, était considéré comme un édifice d'avant-garde.



**Figure I- 9 : Bradbury Building, 1893**

[Source: [www.centercitybrassquintet.com](http://www.centercitybrassquintet.com) ; 2009]

Il existe sans doute d'autres édifices à atrium, comme le montrent les hôtels construits au XIX<sup>ème</sup>, mais il n'est pas possible dans le cadre de cet aperçu historique de tous les énumérer. Pour cela, nous nous sommes penchés sur quelques exemples parmi les plus connus et qui existent toujours, pour signaler l'existence, à cette époque, de la cour vitrée, ancêtre de l'atrium tel que nous rencontrons aujourd'hui.

Comme les passages couverts et les serres, les atriums sombrent dans l'abandon à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cependant, il est important de préciser que certains architectes modernes renouent avec le thème de l'atrium au XX<sup>ème</sup> siècle à l'exemple de Wright qui en 1906 construit le « Larkin Building ». Plus tard, en 1936, il édifie le « Wax Headquarters », un autre bâtiment comportant un atrium. Enfin, le musée Guggenheim terminé en 1959, est l'une des dernières œuvres majeures de Wright comportant un atrium (Figure I-10).



**Figure I- 10 : à gauche le Larkin Building, 1906, à droite le musée de Guggenheim à New York, 1959**

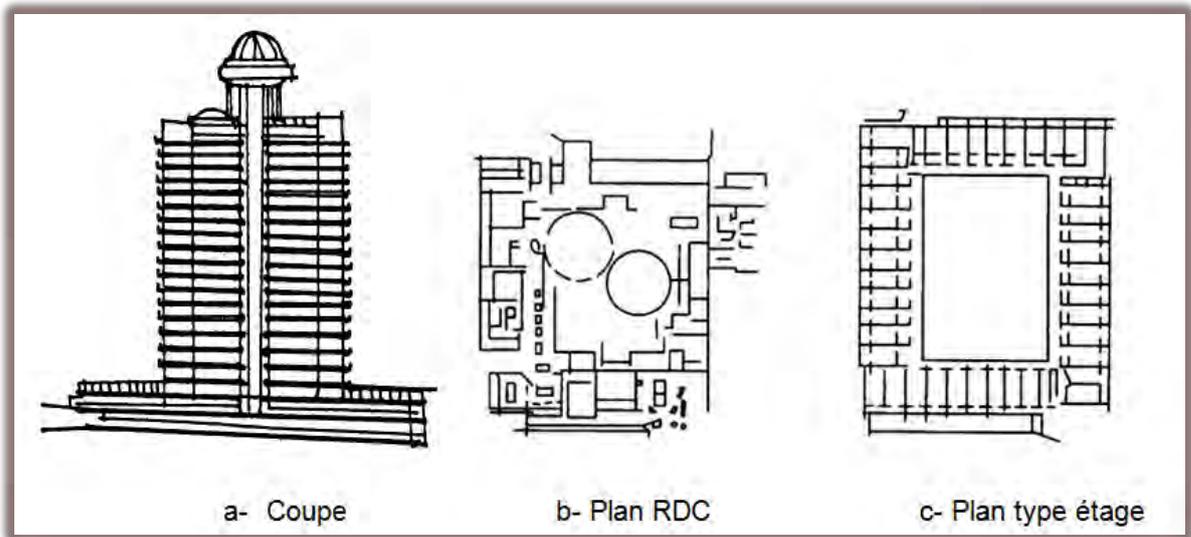
[Belmaaziz, 2003]

### I.2.3. L'atrium moderne:

Après une période de déclin, les espaces zénithalement vitrés de grande dimension, tels que nous les connaissons aujourd'hui, réapparaissent dans les années 60 et 70 aux Etats-Unis et un peu plus tard dans les années 80 en Europe, même si dans certains pays nordiques ils firent leur apparition un peu plus tôt [Wall 1996]. De nombreux projets et réalisations, selon leurs fonctions et leurs programmes, renouent avec les espaces vitrés du XIX<sup>ème</sup> siècle. De nos jours, ces espaces sont incorporés dans divers bâtiments tels que les hôtels, les hôpitaux, les centres commerciaux, les immeubles de bureaux et les bâtiments publics. Le concept de la galerie et de la cour vitrée ou plus généralement de l'espace vitré de grande dimension est réapproprié par les architectes qui en font un élément autour duquel s'articule le projet. En plus de leur vocation classique de lieu d'image, ils deviennent des espaces fonctionnels qui permettent à la fois la desserte de l'édifice, les échanges et la communication. L'engouement des architectes et des maîtres d'ouvrage pour les espaces largement vitrés s'explique par la valeur ajoutée que peut apporter un tel espace à l'édifice. L'identité architecturale, l'effet de transparence entre l'intérieur et l'extérieur et la présence de la lumière naturelle sont autant d'éléments positifs qui concourent au prestige d'un bâtiment. S'il est bien conçu ce dernier sera apprécié par les usagers et donc se vendra et se louera mieux [Lomas 1994]. Toutefois, il convient de noter que les concepteurs n'intègrent pas les grands espaces vitrés uniquement dans les nouveaux espaces bâtis. Ils les incorporent aussi dans de vieux édifices pour relier deux bâtiments ou bien encore transformer l'aspect intérieur pour lui donner une nouvelle fonction.

Les premiers bâtiments influents les bâtiments à atrium dans cette nouvelle période sont le Hyatt Regency Montréal. Atlanta par Edwards et Portman et la Fondation Ford Siège. New York par Roche et Dinkeloo. Le Hyatt Regency est un atrium le long de l'immeuble éclairé par un puits de lumière avec des clerestory vitrés (Figure I-11). L'atrium caractérisé par un vaste espace paysager avec de l'eau. Des plantations et des oiseaux, ce qui reflète la station de la nature. Avec des galeries pour les chambres d'hôtel autour de l'atrium. L'euphorie de l'hôtel Hyatt Regency de Portman est un exemple qui est devenu un succès instantané. Il a révolutionné, et influencé la conception des hôtels plus tard. Le concept de l'atrium de l'hôtel offre une occasion de créer un hôtel de clôture encore grandeur intérieure avec des points de vue stimulant et dynamique. Le succès de cet hôtel atrium est devenu

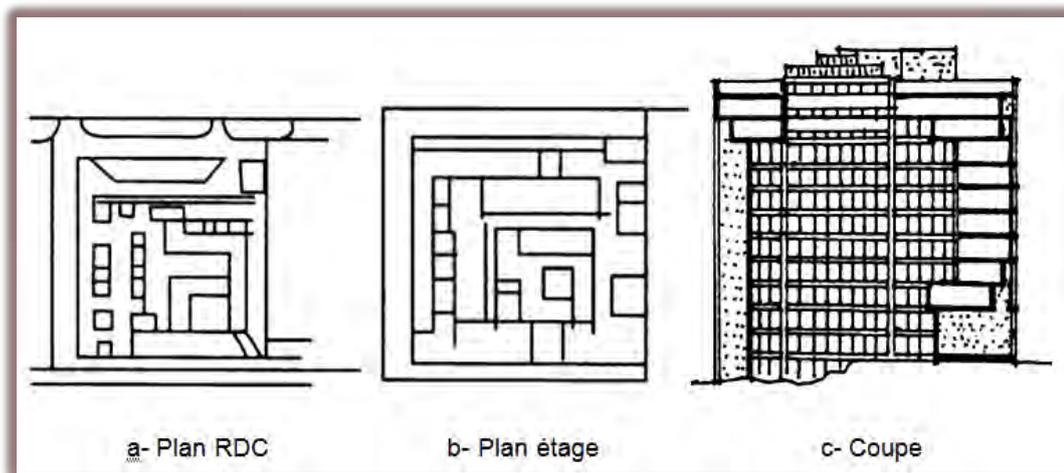
plus tard la norme de prestige pour tous les hôtels de luxe [Bednar. 1986] [Hamdan, Rasdi, 2002].



**Figure I- 11 : Hyatt Regency Hotel, Atlanta by John Portman**

[Hamdan, Rasdi, 2002].

En revanche, la fonction de l'atrium en immeuble de bureaux peut être plus ouvert et se fondre dans le contexte urbain. Par exemple, la Fondation Ford à immeuble avec l'atrium de bureaux à l'angle du plan, agit comme une transition entre l'ambiance de l'atrium et l'environnement urbain, en l'occurrence le parc public menant à la ville dans le quelle l'atrium devient une extension de parc public (Figure I-12).



**Figure I- 12 : le Ford Foundation headquarters building, New York, par Roche et Dinkeloo**

[Hamdan, Rasdi, 2002].

#### I.2.4. Définition de l'atrium moderne:

Il est important de noter que, contrairement à l'intérêt environnemental des atriums traditionnels, la relance du nouvel atrium maintenant favorisée principalement pour ses qualités de commande de l'espace et ces expressions dynamiques. Ainsi, il mène Bednar (1986) à une définition de nouveau atrium comme centroidal, intérieure. L'espace de à éclairage naturel qui organise un bâtiment. Les avantages environnementaux de l'atrium ont été seulement considérés dans son utilisation dans des climats tempérés pendant les années 70 et le début des années 80 comme réponse à la crise pétrolière à l'utilisation de haute énergie dans les bâtiments. La question environnementale et la conservation d'énergie est devenue un enjeu important dans la conception des bâtiments. Ainsi, l'avantage environnemental de l'atrium a été favorisé de nouveau comme une conception caractérisé par une économie d'énergie. Le concept des atriums qui dépendant à la haute technologie sont désormais remplacés par les atriums à plus passifs et basse énergie. Les fonctions traditionnelle de l'atrium l'éclairage naturel, chauffage et refroidissement passif est exploité avec sa qualité de son organisation spatiale. Le bénéfice de l'énergie des atriums est assumé dans une certaine mesure pour réduire automatiquement l'utilisation totale d'énergie dans les bâtiments, mais cela est faux, si l'atrium n'est pas bien conçu et compris [Baker, 1992] [Hamdan, Rasdi, 2002].

. L'application directe de la solution tempérée d'atrium pour les climats chauds est l'une des exemples qui doivent être étudiés. Les Atriums selon Baker, est devenue l'espace intermédiaire, sans climatisation, ventilation naturelle et lumière de jour doivent être sélectif à l'environnement externe, plutôt que exclusive (Baker, 1992). Cette définition peut être étendue pour inclure des conservatoires "qui agissent comme intermédiaires entre l'espace située en dehors de climat et d'un environnement plus contrôlé interne» [Hamdan, Rasdi, 2002]. Ces espaces intermédiaire définis ci-dessus, qui favoriser également l'admission de la chaleur solaire utile, ont été appelés «sunspaces».

En Angleterre, par exemple l'utilisation de «sunspaces» peut être vue dans la conception de Terry Farrell (Figure I-13), et les Hampshire Country Architects (Figure I-14).



Figure I- 13 : Coupe sur le sunspace de Cilifton Nureseries par Terry Farrell

[Hamdan, Rasdi, 2002].

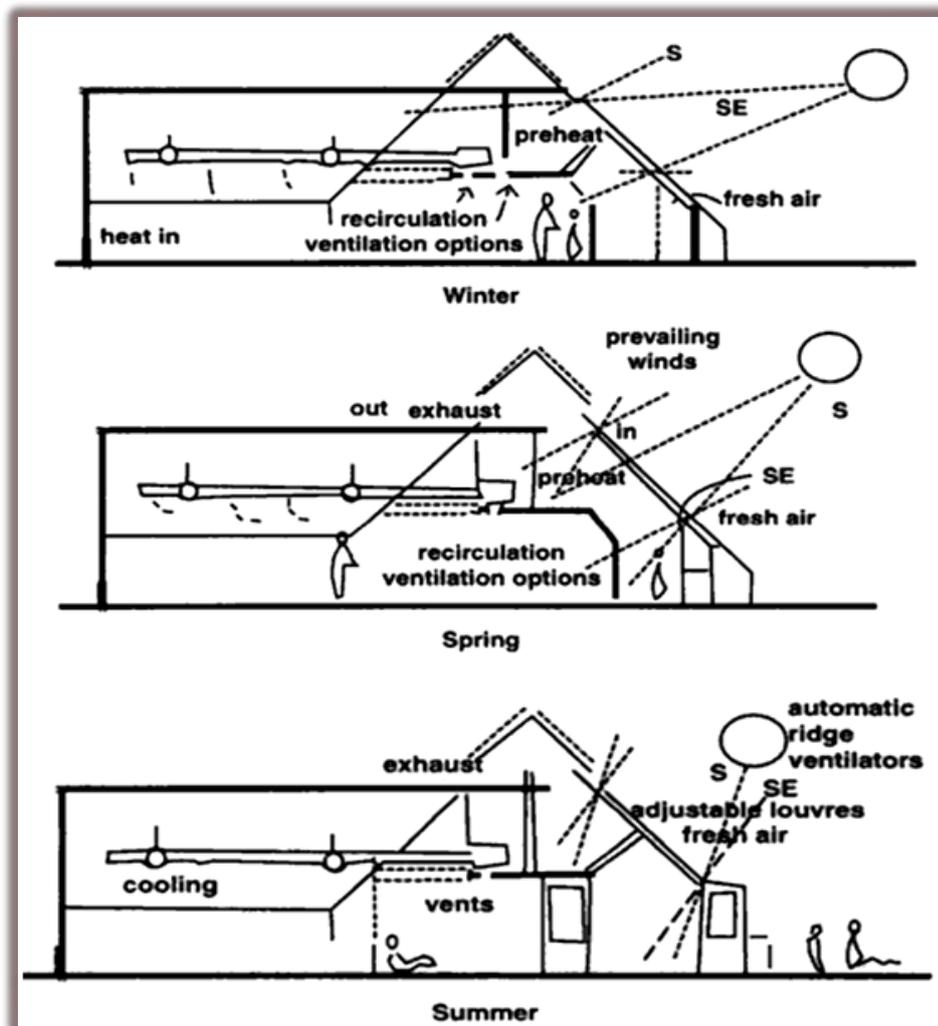


Figure I- 14 : Netley Infant School par Comté d'architectes Hampshir utilisant un conservatoire pour le chauffage passif pendant l'hiver, et équipés de lames réglables direct pour éviter la lumière du soleil dans l'espace pendant l'été.

[Hamdan, Rasdi, 2002].

### **I.3. Typologie morphologique des atriums :**

Après avoir survolé l'évolution des espaces vitrés à travers l'histoire, il convient à présent de s'intéresser de plus près aux aspects formels qui les caractérisent. Sous quelles formes existent-ils aujourd'hui? Existe-il une typologie classifiant ces espaces? Quels sont les aspects formels qui peuvent nous permettre de classifier la panoplie d'espaces de ce genre? Telles sont les questions auxquelles nous nous attelons à répondre dans ce qui suit.

Toutefois, avant d'entreprendre cette analyse typo-morphologique, il est important de préciser qu'actuellement les espaces vitrés de grandes dimensions sont généralement désignés par le terme « atrium ». Si dans l'architecture romaine ce terme désignait une cour centrale ouverte vers le ciel [Bednar 1986], dans l'architecture contemporaine il renvoie plutôt à un espace central recouvert par un vitrage. Mais le terme est aussi repris pour qualifier d'autres espaces largement vitrés. Pour éviter toute confusion et parce que le terme « espace largement vitré » nous semble trop général, nous utiliserons dorénavant le terme « atrium » tel qu'il est employé aujourd'hui en le qualifiant selon la morphologie de l'espace.

#### **I.3.1. Les typologies existantes :**

Plus qu'un simple vide inscrit dans le bâtiment, à la manière d'un espace résiduel, l'atrium développe une véritable typologie : sa volumétrie le plus souvent pure et son ossature ainsi que sa forme développent une autre échelle du projet ; ce n'est donc pas un vide mais une architecture propre. Certains le conçoivent comme un vide habité.

La conception de tels lieux est sujette à la créativité de l'architecte qui souvent veut en faire l'élément autour duquel s'articulent d'autres parties du projet. Cette créativité obéit elle-même à des contraintes liées à des considérations externes comme la forme urbaine, à des exigences du programme architectural (fonction du bâtiment, circulation, desserte, etc) ou bien aussi à des préoccupations énergétiques ou lumineuses. C'est ce qui explique le fait que l'atrium existe sous une multitude de formes. Compte tenu de cette diversité, il est cependant possible de classifier les formes les unes par rapport aux autres. De nombreuses études menées dans ce sens fournissent les différentes formes sous lesquelles on peut retrouver ces espaces [Kainlauri 1987, Robertson 1991, Scudo et al. 1993, Bryn 1995]. La figure suivante résume les typologies généralement rencontrées.

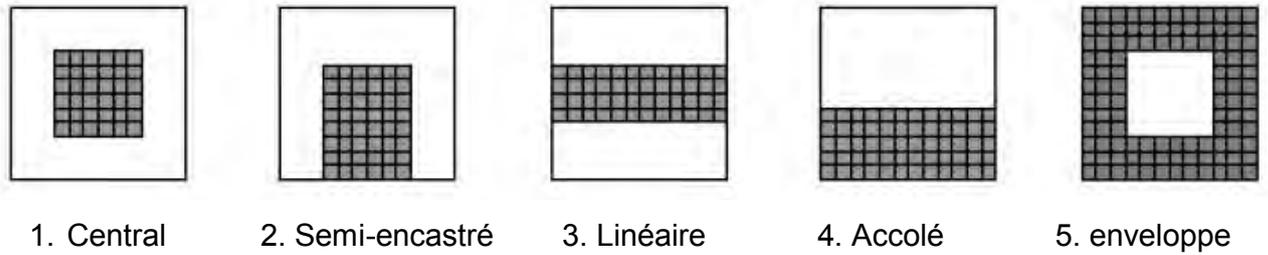


Figure I- 15 : typologie générale des atriums

[Belmaaziz, 2003]

Hormis cette classification, qui est essentiellement basée sur l'emplacement de l'atrium par rapport au bâtiment, une typologie plus exhaustive a été établie par Yoshino [Yoshino et al. 1995] à partir d'une étude statistique sur environ deux cents atriums construits au Japon. Ce recensement (effectué en se servant de revues d'architecture) a permis à l'auteur de classer les atriums non seulement en tenant compte du positionnement du volume vitré mais aussi de ses proportions (Figure I-16).

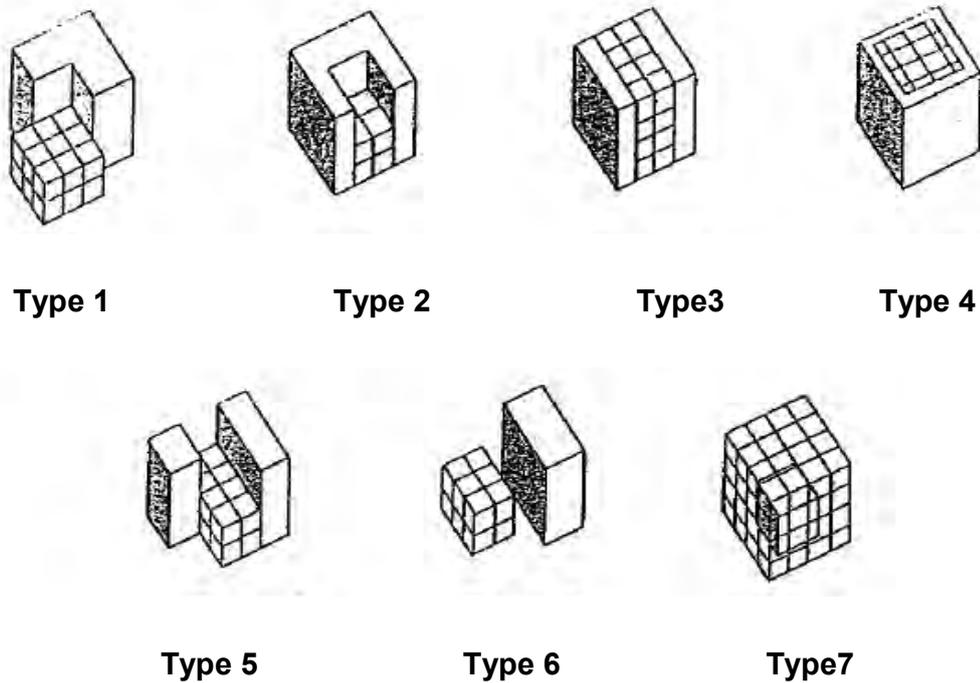
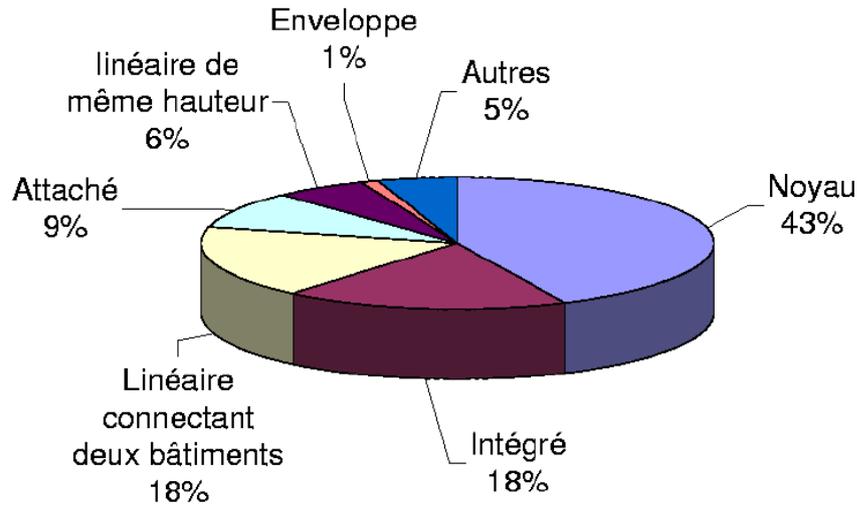


Figure I- 16 : classification établie par Yoshino

[Yoshino, 1995]



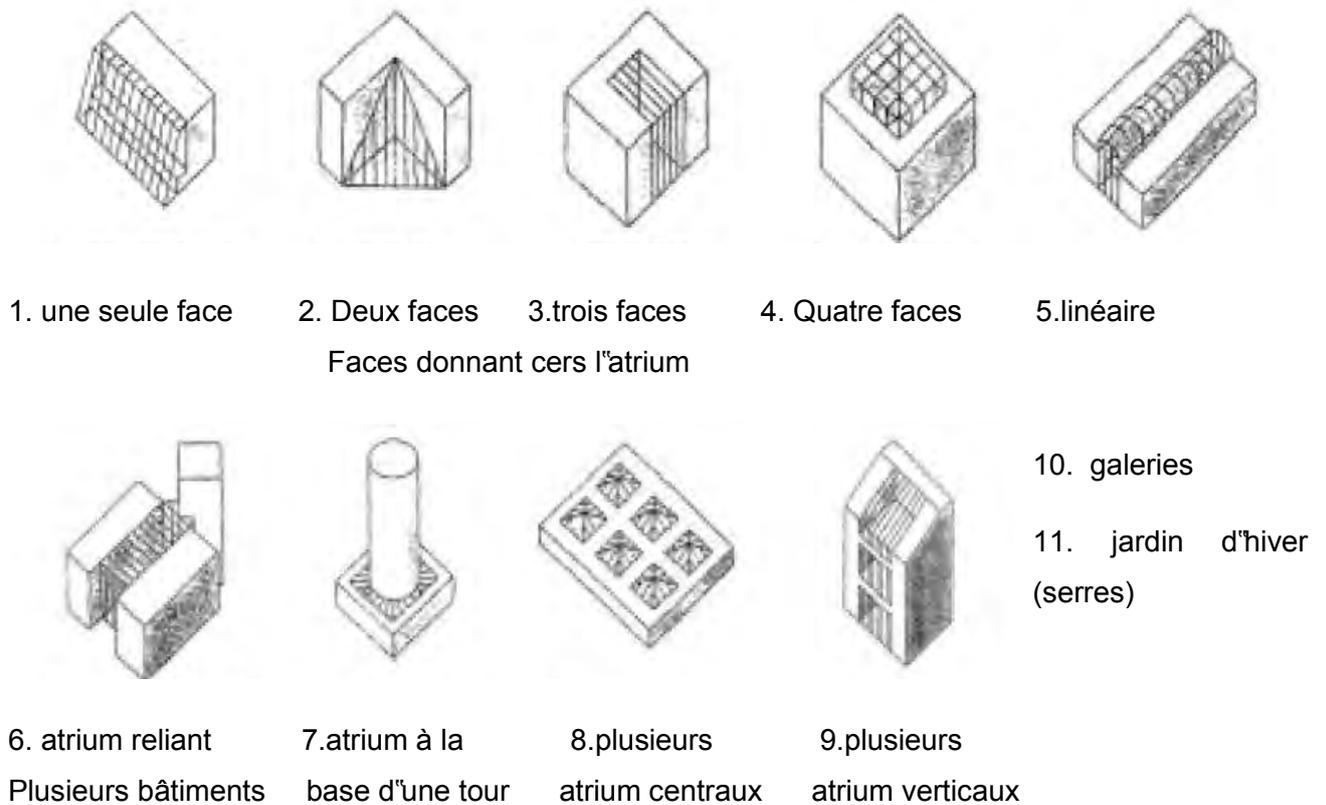
**Figure I- 17 : Type des atriums d'après une étude japonaise sur 200 bâtiments a atrium**

[Yoshine et al.1995]

En comparant cette typologie avec celle plus générale présentée plus haut nous pouvons remarquer l'apparition de trois nouveaux types d'atriums (types 1,5 et 6). Le type 1 peut être considéré comme intermédiaire entre l'atrium accolé et encastré. Le type 5 se présente comme une variante du type accolé bien qu'il soit à la fois linéaire et liant deux parties distinctes d'un même bâtiment. Enfin, le type 6 est un volume totalement vitré et indépendant. Ce dernier ne représente qu'un très faible pourcentage par rapport aux autres atriums. A ce sujet, l'auteur précise que le type le plus fréquemment rencontré est l'atrium central (43,5 %). A l'opposé, le type 7 présente un pourcentage insignifiant par rapport aux autres types. En effet, rares sont les concepteurs s'aventurant à envelopper le bâtiment d'un grand espace totalement vitré surtout lorsqu'il s'agit de climats chauds.

Dans une perspective analogue, une autre étude a été entreprise au Royaume-Uni portant sur environ deux milles atriums construits [Lomas et al. 1994]. Pour classifier l'ensemble des atriums inventoriés, les auteurs s'appuient sur la typologie établie par Saxon [Saxon 1983]. Ce dernier dresse un éventail des formes spatiales d'atriums qu'il classe selon onze catégories (Figure I-18). Parmi celles-ci, certaines peuvent plus être considérées comme des variantes de configurations de base. A titre d'exemple, l'atrium linéaire ouvert des deux côtés (type 5) peut être assimilé à l'atrium du type 6 qui lui aussi est linéaire même s'il est destiné à faire la jonction entre plusieurs bâtiment. Les deux types

appartiennent à une même famille, celle des atriums linéaires. De la même manière, le type 8 composé de plusieurs atriums centraux est une variante de l'atrium centrale du type 4. 1.une seule face.



**Figure I- 18 : typologie des atriums établie par Saxon**

Les auteurs précisent, qu'en tenant compte de cette typologie, les atriums étudiés peuvent être classifiés selon quatre grandes tendances. Le premier genre compte les atriums centraux (type 4). Dans ce cas, quatre faces du bâtiment sont ouvertes vers l'atrium. Le second comprend les atriums adossés au bâtiment (type 1). Le troisième couvre les atriums encastrés dont trois faces du bâtiment donnent vers l'atrium (type 3).

Enfin, le dernier genre regroupe toutes sortes d'atriums linéaires (type 5).

### **I.3.2. Proposition d'une typologie :**

Les typologies que nous avons présentées, aussi différentes soient-elles, montrent la diversité des formes architecturales sous lesquelles un atrium peut exister. La démarche qui consiste à répertorier toutes les formes d'atriums construits et les classifier a le mérite d'être exhaustive puisqu'elle fait de chaque forme une classe à part entière. Cependant,

cela risque d'aboutir à une classification compliquée. De plus, l'apparition de nouveaux atriums pouvant recouvrir toutes les formes possibles et imaginables peut très vite rendre cette approche difficilement contrôlable. De notre point de vue, les formes si diverses soient-elles, appartiennent toutes à des archétypes de base qu'il est essentiel de définir. Toute nouvelle forme serait dans ce cas à classer, de par sa tendance de conception, selon l'archétype dont elle se rapproche le plus. Pour cela nous proposons dans ce qui suit de définir une typologie de base qui sert à classer toutes les formes rencontrées.

La typologie morphologique (non liée à la taille) des atriums peut être faite à partir de deux critères :

- le positionnement par rapport au volume habité
- la proportion des dimensions de son volume intérieur

#### **I.3.2.1. Critères de positionnement :**

Bâtir une typologie des atriums revient à recenser les différents cas d'atriums que l'on peut rencontrer dans l'architecture. Une possibilité réside dans une exploration allant de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments, ce qui a le mérite de faire varier l'intérêt fonctionnel de l'atrium ainsi que la manière dont il se présente pour un visiteur : « attribut de façade » ou « volume intérieur ». Ce critère de positionnement va également régler le nombre de faces vitrées en contact direct avec l'extérieur.

Dans cette voie, on peut donc imaginer trois types fondamentaux d'atriums, à l'instar de ce qui avait été fait pour la typologie des serres et vérandas, la différence principale étant de l'ordre de la taille :

- les atriums « accolés » (aux bâtiments)
- les atriums « semi-encastés » (dans les bâtiments)
- les atriums « encastés » (dans les bâtiments)

Le critère de positionnement par rapport au bâtiment a nécessairement une influence sur la fonctionnalité de l'atrium :

- Les atriums « accolés » servent à marquer et/ou protéger l'entrée d'un bâtiment (fonction de « sas »), ou à couvrir une extension de ce bâtiment (comme une sorte de protubérance).



**Figure I- 19 : exemples d'atriums accolés : ils présentent 3 à 4 faces vitrées extérieures**

[Belmaaziz, 2003]

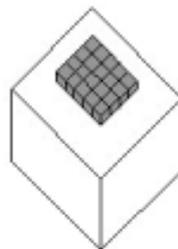
- Les atriums « semi-encastés » peuvent avoir la même fonction, à laquelle on peut ajouter celle de la desserte interne puisqu'il y a pénétration de ce volume dans celui du bâtiment.



**Figure I- 20 : exemple d'atriums semi-encastés : ils ont 1 à 2 faces vitrées extérieures, à dominante verticale**

[Belmaaziz, 2003]

- Les atriums « encastrés » servent avant tout de desserte interne, la fonction d'accès se faisant alors par le bâtiment lui-même qui entoure le volume de l'atrium. On peut citer aussi pour ce type, la création d'une fonction de « centralité » du bâtiment, lieu de rencontre privilégié.



**Figure I- 21 : exemple d'atrium encastré : une seule face vitrée horizontale (ou à composante horizontale dominante)**

[Belmaaziz, 2003]

### I.3.2.2. Critères de proportion :

Pour un positionnement donné, un atrium peut revêtir diverses formes, qui se traduisent par des rapports de proportion entre ses dimensions : longueur, largeur (profondeur), hauteur.

La pertinence de ce critère se mesure essentiellement au plan thermique : la compacité, par exemple, est une caractéristique importante pour les échanges thermiques.

De ce point de vue, on se limitera à deux cas :

- L'atrium « ponctuel », dont aucune dimension n'est prédominante
- l'atrium « linéaire », dont une dimension, en général la longueur, est nettement plus importante que les autres.



**Figure I- 22 : atrium ponctuel (à gauche), atrium linéaire (à droite)**

[Belmaaziz, 2003]

### I.3.2.3. Combinaison des deux critères :

Par combinaison des deux critères, on pourra donc avoir affaire à la typologie complète suivante:

- Les atriums « accolés ponctuels »
- Les atriums « accolés linéaires »
- Les atriums « semi-encastés ponctuels »
- Les atriums « encastrés ponctuels »
- Les atriums « encastrés linéaires »

Le cas « atrium semi-encasté linéaire » n'est pas retenu, car il devient assimilable à un atrium « accolé linéaire ».

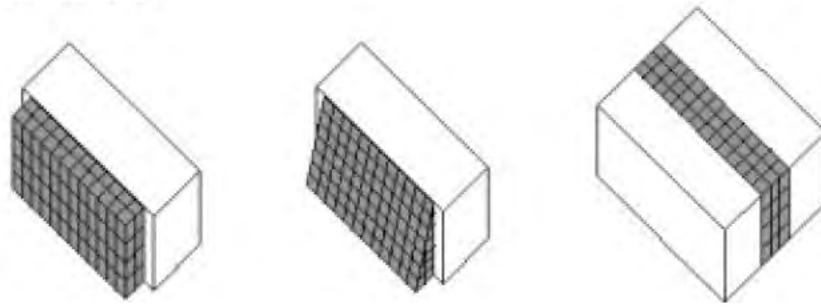


Figure I- 23 : atrium « accolé linéaire » à 3 et 4 faces vitrées et atrium encastré linéaire

[Belmaaziz, 2003]

#### I.4. Destination des atriums :

On retrouve l'atrium, sous ses diverses formes, dans presque tous les programmes de construction, qu'il s'agisse du secteur public ou privé. Les deux études menées au Royaume-Uni et au Japon qui sont citées plus haut permettent d'avoir plus de précisions à ce sujet [Lomas et al. 1994, Yoshino et al. 1995]. La première indique que 50 % des immeubles à atrium appartiennent à des promoteurs immobiliers, preuve que ce secteur compte bien sur ce genre d'espace pour faire la promotion de ces bâtiments. 25 % d'entre eux relèvent du secteur public alors que le reste appartient à des propriétaires privés (Figure I-25). Cette étude révèle aussi que 60 % de ces atriums sont présent dans des immeubles de bureaux. Moins nombreux, les édifices commerciaux et industriels représentent 30 % des édifices à atrium. Le secteur de l'éducation ainsi que d'autres bâtiments se partagent le reste (Figure I-24). Il est intéressant aussi de noter que cette étude estime que le nombre d'atriums est en net accroissement au Royaume-Uni et elle prévoit la construction de 1500 à 2000 atriums dans les 30 ans à venir (entre 2001 à 2030).

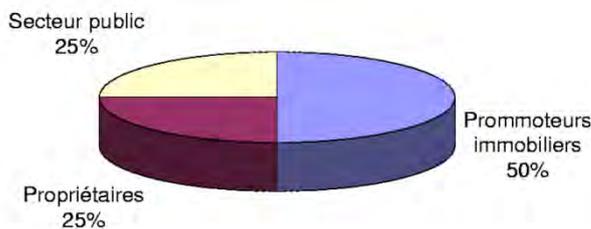


Figure I- 25 : Catégorie des constructeurs des atriums d'après l'étude « Atrium Studies Technical Review » de Lomas et Eppel (1994) recensant 2000 bâtiments à atrium au Royaume-Uni

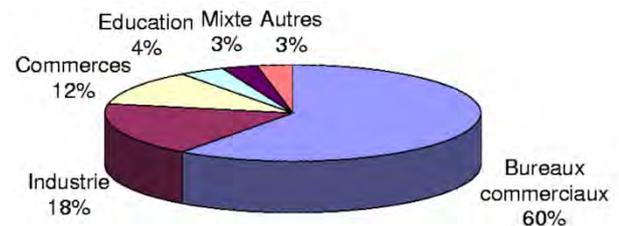
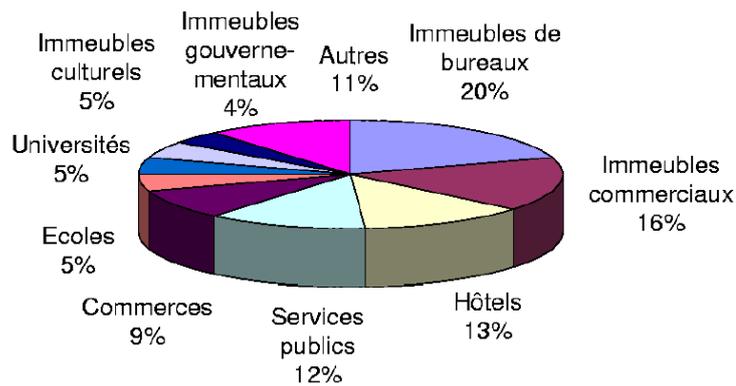


Figure I- 24 : Type d'activité des immeuble à atrium d'après l'étude « Atrium Studies Technical Review » de Lomas et Eppel (1994) recensant 2000 bâtiments à atrium au Royaume-Uni



**Figure I- 26 : Type d'activité des immeubles à atrium au Japon, d'après l'étude japonaise de Yoshino (1995) sur 200 bâtiments à atrium**

La deuxième étude, menée au Japon, spécifie aussi les secteurs auxquels appartiennent les atriums recensés. Les immeubles de bureaux occupent la première place (20 %), juste derrière on retrouve les édifices commerciaux (16 %), ensuite les hôtels (13 %) et les bâtiments publics (12 %). Cette étude est plus exhaustive que la première car elle va jusqu'à spécifier la vocation de l'atrium par rapport au bâtiment. La majorité des atriums est exploitée en tant que hall d'entrée au bâtiment (40 %). 25 % d'entre eux jouent le rôle de place intérieure alors qu'à peu près 20 % sont des lieux de détente. Les atriums restants jouent le rôle de passage, de galerie ainsi que d'autres rôles qui ne sont pas spécifiés (Figure I-26).

Pour conclure, ces deux études, même si elles ne concernent seulement que deux pays, tendent à montrer qu'en général les immeubles de bureaux ainsi que les bâtiments à forte affluence du public comptent parmi les édifices principaux à intégrer un atrium.

#### **I.4.1. Fonction des atriums :**

En plus de la valeur esthétique que génère l'introduction d'un atrium dans un édifice, à quoi sert-il vraiment? En d'autres termes, quelles sont les raisons qui motivent les architectes à l'introduire comme élément constitutif dans un projet? Cette question renvoie directement aux fonctions que remplit un tel espace. Elles sont de plusieurs ordres :

#### **I.4.1.1. Sur le plan de l'éclairage naturel :**

Il est à première vue évident que l'importante surface vitrée zénithale, qui caractérise un atrium est essentiellement destinée à l'éclairage naturel. Cela est d'autant plus évident quand il s'agit d'un bâtiment de grande épaisseur. Le fait d'ouvrir une partie du bâtiment vers le ciel a l'avantage de désenclaver l'espace qui, sans cela, risque de paraître confiné.

En effet, un toit vitré offre au concepteur la possibilité d'éclairer à la fois le volume couvert par la verrière mais aussi les espaces adjacents tel que des bureaux par exemple. Favoriser l'éclairage naturel aux dépens de l'éclairage artificiel à l'avantage aussi de réduire les consommations énergétiques du bâtiment et de produire des effets lumineux différents de ceux que procure une baie verticale. La qualité de la lumière naturelle baignant un espace éclairé par le haut justifie en partie l'intérêt que portent les architectes aux atriums.

#### **I.4.1.2. Sur le plan thermique :**

La couverture vitrée ne permet pas seulement l'éclairage naturel. Le rayonnement solaire qui la traverse fait souvent de l'atrium un espace tempéré puisque sa température d'air est souvent plus chaude qu'à l'extérieur. Cet espace tampon entre l'intérieur et l'extérieur peut devenir la raison principale qui motive le concepteur à introduire un atrium surtout dans les pays nordiques où la saison hivernale est longue et rude. Les usagers, tout en étant à l'abri des intempéries, se trouvent dans des conditions d'ambiance nettement plus confortables qu'à l'extérieur. Dans ces régions, l'atrium joue parfois le rôle d'un système passif de récupération de chaleur qui sert au préchauffage de l'air externe en vue de chauffer les espaces adjacents.

#### **I.4.1.3. Sur un plan subjectif :**

Subjectivement parlant, il est important de noter qu'en fermant l'espace par une verrière le concepteur suggère une intériorité sans la réaliser complètement car dans ce type d'espace on ne vit plus dans un volume véritablement clos. En effet, tous deux réunis, les paramètres objectifs que nous venons de citer, à savoir la lumière naturelle et la température participent à favoriser une sorte de dialectique entre le dedans et le dehors de l'atrium. C'est en termes d'opposition que cette dialectique est la plus sensible et semble séduire les usagers. L'effet d'intériorité se joue aussi en toiture ou à travers les murs pignon. L'utilisation d'une couverture translucide diffuse une lumière homogène et intense qui renforce l'autonomie du lieu. Au contraire, au nom de la transparence une couverture

transparente associée parfois à des vues vers l'extérieur permet de refléter les variations climatiques tout en étant à l'abri, ce qui accentue le sentiment « d'entredeux », l'intérieur et l'extérieur. Ceci est un problème spécifiquement architectural et il appartient au concepteur d'opter pour un volume introverti ou au contraire extraverti.

#### **I.4.1.4. Sur le plan fonctionnel :**

Dans un tout autre registre, fonctionnel celui-ci, l'atrium permet un bon fonctionnement interne du bâtiment. En tant qu'élément du projet il est d'une part utilisé pour la desserte. Souvent, c'est ce lieu qui donne accès aux différents locaux. D'autre part, l'atrium peut être exploité comme espace de circulation. Il peut servir uniquement à la circulation au niveau du rez-de-chaussée ou bien dans plusieurs configurations, des coursives et des passerelles desservent les niveaux supérieurs. Dans ce cas, la circulation horizontale est associée à une circulation verticale par des escaliers ou des ascenseurs visibles qui participent à l'animation du volume par le mouvement.

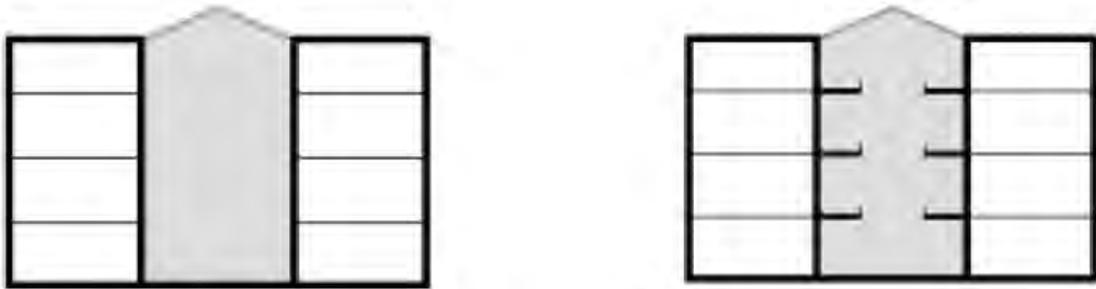
La vocation de l'atrium ne se réduit pas à la circulation et la desserte. Il peut aussi être un lieu d'accueil, de rencontres, de réceptions et d'expositions car le grand volume de l'atrium se prête à l'ouverture au public. Souvent, l'espace est agrémenté de plantes pour renforcer l'hospitalité des lieux. Dans d'autres cas, l'atrium n'a pas de fonction précise si ce n'est l'éclairage naturel. Cela peut être constaté dans certains atriums dont le volume n'est pas accessible.

#### **I.4.2. Organisation interne :**

Les exemples d'atriums construits que nous rencontrons tendent à montrer que la vocation fonctionnelle de l'atrium dans un bâtiment conditionne son organisation interne. Si l'espace est destiné à la circulation au niveau du rez-de-chaussée, l'occupation se réduira au niveau du sol et les espaces adjacents donneront directement vers le vide de l'atrium. Dans ce cas, on peut désigner le volume par le terme d'« atrium lisse ». Il arrive aussi que l'atrium soit conçu pour desservir les étages par l'intermédiaire de coursives qui font partie du volume et qui longent les espaces adjacents. Dans ce cas, l'atrium peut être qualifié d'« alvéolaire » puisque les planchers des coursives divisent partiellement le volume en plusieurs zones ou alvéoles (Figure I- 27). Un atrium sera d'autant plus alvéolaire que le nombre des coursives sera élevé et que sa largeur sera grande. Dans des travaux menés par le laboratoire ABC sur le sujet des atriums, ils ont tenté d'établir un degré d'alvéolarité

qui serait exprimé à travers un coefficient défini comme étant le rapport entre le linéaire des parois horizontales et l'aire de la section transversale de l'atrium. Ce coefficient s'écrit donc de la manière suivante : Coefficient d'alvéolarité  $Ca = \Sigma.Lh/Sa$ .

$\Sigma.Lh$  étant le cumul des longueurs des parois horizontales autres que la couverture et le sol de l'atrium et  $Sa$  la section de l'atrium en  $m^2$ .



**Figure I- 27 : à gauche, un atrium lisse. A droite, un atrium alvéolaire**

[Belmaaziz, 2003]

Il est cependant possible de rencontrer d'autres variantes de l'atrium lisse ou alvéolaire. Donnons pour exemple un atrium qui comporterait des coursives sur un seul côté. Dans ce cas il peut être considéré comme partiellement alvéolaire ou partiellement lisse. Notons tout de même que les deux tendances univoques de base correspondent tout de même à une majorité d'exemples construits.

### **1.5. La fonction paradoxe de l'atrium:**

Le rôle principal de l'atrium traditionnelles c'est qu'il est un modificateur de climat et un générateur spécial qui donne lieu à un certain nombre d'objectifs secondaires. Par exemple, l'esthétique de ces atriums est utilisé comme un appareil, en projetant l'image de l'entreprise et de statut. Plus tard Les avantages incluent la conservation de bâtiment. Des dispositifs de la conception urbaine et de loisirs. Ces différentes raisons de soulever un atrium dans les bâtiments ont contribué a un terminologie contradictoire. Bednar (1986) indication de la confusion des descriptions même du mot « atrium » et « cour » dans des dictionnaires divers. encore, les différentes approches peut être faire partie de la raison de ce que Baker (1992) et de Saxe (1984) identifient comme plus préoccupant du manque de compréhension lorsque les concepteurs de certains atrium bâtiments ont été interrogés sur les objectifs de contrôle de l'environnement. Ils ont été surpris de trouver certains qui croyaient que l'utilisation d'un atrium entraîneraient automatiquement un bâtiment

éconergétique. L'utilisation actuelle des atriums dans les bâtiments modernes de l'Algérie témoigne de ce paradoxe où l'atrium est clairement utilisé comme un dispositif de commande, mais où les conséquences pour l'environnement doivent être examinées plus attentivement. Le coût de l'énergie qui sont engagés dans le maintien d'un environnement acceptable dans ces bâtiments en raison de l'atrium, à peine croire que c'est une modification sensible du climat.

### I.6. L'alternative des concepts pour le design des atriums :

Deux grands concepts des bâtiments à atrium ont été mis en avant par Saxon (1986) dans son livre « *Atrium Buildings: Development and Design* » (Figure I-28) illustre ces concepts et les approches qui peuvent être classées en vertu de ces concepts. Son description d'un "carnivore approach" de la conception de l'atrium. La conception de l'atrium est très "orientée vers le progrès", qui est associée à la haute technologie. Des attitudes futuriste et des solutions optimistes mégastructure. Le concept alternatif de Saxon, « l'approche herbivore » est plus en accord avec la conception consciente d'énergie, pensée culturelle, historique et à travers des gestes urbaine sensible. Par conséquent, l'approche herbivore est responsive à la culture et aux traditions locales de climat.

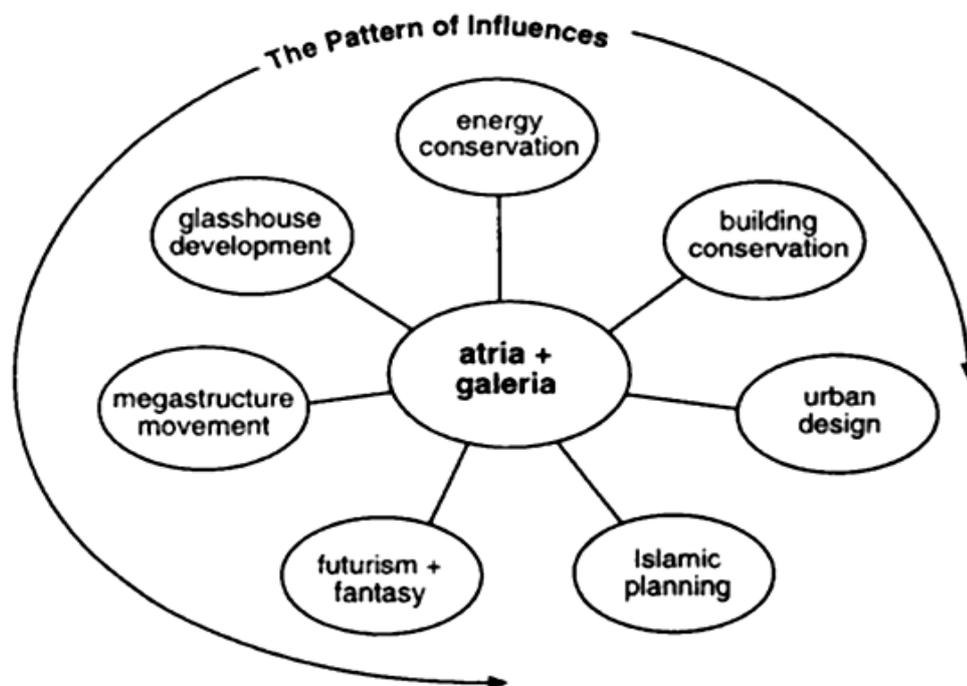


Figure I- 28 : approche de la conception pour la construction à atrium et l'évolution des influences

[Hamdan, Rasdi, 2002].

## I.7. Conclusion :

Nous avons présenté à travers ce premier chapitre un aperçu historique des espaces vitrés. Sans que l'on puisse prétendre à l'exhaustivité, ce bref résumé nous permet de donner l'essentiel des étapes qui ont jalonné le cheminement qu'ont connu les espaces vitrés de grande dimension jusqu'à devenir les atriums que nous connaissons aujourd'hui. Ensuite, nous avons entrepris une analyse typo-morphologique sur les classifications des différentes formes existantes. Constatant la diversité et la complexité de ces classifications, nous avons proposé d'établir notre propre typologie qui se veut plus simple quant aux critères de classification. Celle-ci est basée sur deux critères architecturaux facilement identifiables qui sont le positionnement par rapport au bâtiment et les proportions de l'atrium. A partir de cette typologie il nous est possible de cataloguer toutes les variantes d'atriums.

Après avoir effectué un tour d'horizon de la représentativité des bâtiments à atrium dans le contexte architectural actuel, les secteurs où ils sont les plus présents et les configurations les plus prisées, nous nous sommes intéressé à mettre en évidence certains aspects qui poussent les architectes à introduire un atrium dans le projet. De notre point de vue, nous considérons que ces aspects sont d'abord liés à la volonté de créer un espace hors du commun de par sa qualité des ambiances et cela à travers :

- La qualité de la lumière naturelle arrivant par la toiture vitrée
- La création d'un espace tampon grâce au climat tempéré qui y règne

Ensuite, il faut tenir compte de la capacité à régler certains problèmes fonctionnels. A ce titre, selon le mode de desserte du bâtiment, cela nous a permis de distinguer deux configurations qui répondent à deux modes de desserte différents. Il s'agit de l'atrium lisse et de l'atrium alvéolaire.

CHAPITRE

=



**...Caractérisation  
des ambiances thermiques  
dans les atriums**

## II.1. Introduction :

Mises à part les considérations d'ordres formel et fonctionnel, il est important de se pencher sur les aspects liés au comportement thermique qui caractérisent les ambiances dans les atriums. En dépit de ce que peut apporter la toiture vitrée au niveau de l'éclairage, elle est la cause de contraintes thermiques, principalement solaires. En effet, les apports énergétiques solaires sont assez importants lorsque la surface zénithale est grande. Si, comme nous l'avons déjà annoncé, pendant la saison hivernale ces apports sont bénéfiques, parce qu'ils participent au bien être de l'utilisateur, ils peuvent durant la saison estivale être source d'inconfort surtout lorsque l'atrium est localisé sous des latitudes moyennes. Les surchauffes que peut engendrer un atrium sont des phénomènes assez connus de la part des concepteurs et des chercheurs, il suffit de constater le grand nombre de publications qui traite de ce sujet pour se rendre compte que ce problème récurrent reste un souci majeur à ne pas négliger lors de la conception.

A s'intéresser aux ambiances thermiques dans les atriums, nous sommes donc confrontés à l'interdépendance qui existe entre les sollicitations externes et l'intérieur. A ce sujet, il est bien évident que les flux solaires sont, dans le cas d'espace fortement vitré, parmi les sollicitations extérieures principales qui influent sur le confort l'été. En premier lieu, il s'agira dans ce qui suit de mettre au jour les processus par lesquels se produisent les surchauffes en éclaircissant les phénomènes qui y conduisent ainsi que l'interaction entre eux. En deuxième lieu, il sera question d'approcher les phénomènes thermiques spécifiques aux atriums que les concepteurs redoutent tels que la stratification thermique. Compte tenu de la variabilité spatiale et temporelle de ce phénomène, celui-ci sera analysé sous divers aspects. En nous appuyant sur des études déjà menées, notre objectif consistera donc à dégager les paramètres susceptibles d'agir sur ce phénomène.

## II.2. Spécificités des ambiances thermiques dans les atriums :

### II.2.1. Spécificités liées au vitrage : l'effet de serre

L'effet de serre induit par une surface vitrée est assez connu. Les matériaux dits transparents ou translucides laissent en grande partie traverser le rayonnement solaire incident. C'est le principe du gain solaire tel qu'il existe à travers n'importe quelle surface vitrée. Le rayonnement solaire (de courte longueur d'onde CLO) traverse en partie le vitrage et vient chauffer les matériaux composant les différentes parois (l'enveloppe interne

dans le cas d'un atrium) qui l'absorbent. A leur tour, celles-ci émettent un rayonnement de grande longueur d'onde (GLO). La grande particularité du vitrage est qu'il est imperméable ce type de rayonnement (GLO) émis par les parois ou corps environnants. Ainsi la chaleur ayant pénétré se trouve piégée. Il s'ensuit alors une augmentation de la température ambiante pendant la journée qui peut, si les flux solaires sont importants, conduire à la surchauffe.

Nous pouvons rencontrer ce phénomène dans tout espace vitré soumis à l'ensoleillement. Cependant, dans un atrium, la disposition horizontale du fenêtrage permet en été un ensoleillement des parois bien plus important que lorsqu'il s'agit d'une surface vitrée verticale, ce qui accentue le phénomène d'effet de serre. Ajouté à cela, les propriétés du vitrage (transmission, réflexion et absorption) jouent un rôle considérable sur la quantité des flux solaires transmis.

### **II.2.2. Importance des échanges radiatifs :**

Les radiations solaires ont une grande influence sur les ambiances thermiques d'un atrium. Généralement, la distribution des flux solaires à l'intérieur d'un local classique n'est pas prise en compte surtout quand le vitrage est de taille ordinaire. Dans ce cas, les flux solaires (CLO) et les transferts radiatifs (GLO) sont approximativement estimés en utilisant des simplifications qui donnent d'assez bons résultats. Pour un espace excessivement vitré tel qu'un atrium ces simplifications sont contestables ; il est alors important de modéliser correctement les différents échanges radiatifs [Wall 1996]. Plusieurs études menées dans ce sens montrent la nécessité de la prise en compte de ces aspects dans le cas de volumes très vitrés [Pfrommer 1995, Schild 1996, Voeltzel 1999]. Les travaux effectués donnent des indications sur les phénomènes qui doivent être pris en compte dans la modélisation. Dans ce qui suit nous présentons une synthèse de ces considérations.

#### **II.2.2.1. Les flux solaires (CLO) :**

Les flux solaires qui atteignent les parois de l'atrium traversent la toiture vitrée. L'importance de ces flux dépend à la fois des masques environnants et des caractéristiques du vitrage, en l'occurrence du coefficient de transmission. Comme la toiture est destinée à l'éclairage naturel, elle est souvent faite d'un vitrage clair qui permet de bénéficier au maximum de la lumière du jour. Implicitement cela veut dire que le coefficient de transmission du vitrage est élevé. Il s'ensuit alors des apports solaires importants. Comme

on peut le constater, la recherche de la performance en matière d'éclairage et la lutte contre les gains solaires l'été pour éviter les surchauffes sont un sujet de controverse. Ces deux aspects antinomiques nécessitent un ajustement adéquat du taux de surface vitrée.

Nous n'aborderons pas ici les différents calculs nécessaires à la détermination des flux solaires directs et diffus en fonction du lieu, du jour de l'année et de l'instant de la journée car ce genre d'informations est très détaillé dans de nombreuses publications [Mazria, 1981, Siret 1997, Miguet 2000]. Nous aborderons plutôt les différentes composantes qui constituent les flux solaires absorbés par l'enveloppe interne de l'atrium.

Les gains solaires nets reçus par une paroi intérieure sont la somme des flux solaires directs, des flux diffus provenant de la voûte céleste et des flux réfléchis par les parois environnantes.

Pour évaluer les échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde (CLO), il est important de discrétiser le plus finement possible les parois de l'atrium. En premier lieu, cette discrétisation sert à déterminer quelles parties de ces parois sont au soleil ou à l'ombre. Cela revient donc à décrire les contours de la tache solaire et évaluer les flux solaires directs reçus par les parois. Cet aspect est important à prendre en compte car la tache solaire a une grande influence à la fois sur les températures de surface des parois et les températures et les mouvements d'air [Groleau et al. 1994]. Cet aspect sera étudié plus loin. En deuxième lieu, le maillage permet d'évaluer les flux diffus reçus par les parois provenant de la voûte céleste. Les deux composantes des flux direct et diffus reçues qui pénètrent à travers le vitrage et qui arrivent sur les parois sont en partie absorbées par celle-ci. La partie restante est réfléchie suivant un coefficient de réflexion (ou albédo) qui dépend de la couleur du matériau de chaque paroi. Dans le cas d'un atrium, certaines parois internes sont vitrées car elles servent à l'éclairage des locaux adjacents. Il est impératif que la transparence du vitrage interne soit intégrée dans les calculs. Ainsi une partie des flux arrivants sur le vitrage interne est retransmise aux locaux avoisinants. De même, il est nécessaire de prendre en compte la transparence de la toiture car une partie des flux est réfléchi par les parois internes et traverse le vitrage zénithal [Wall 1996, Voeltzel et al. 2001]. La figure suivante illustre le principe de distribution des flux CLO dans l'atrium.

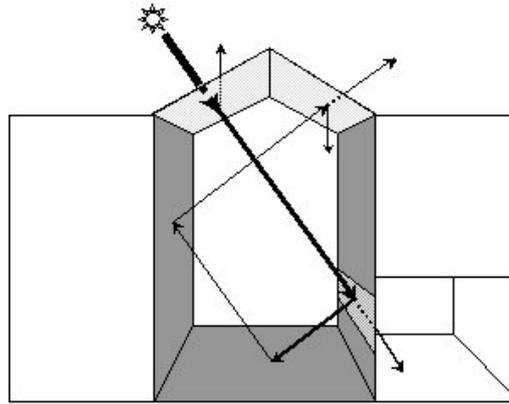


Figure II. 1 : distribution des flux solaires sur les parois internes de l'atrium

[Belmaaziz, 2003]

Le flux réfléchi d'une paroi à une autre subit un processus de multi-réflexions qui dépend du facteur de forme d'une paroi par rapport à une autre. Finalement, après le processus de multi-réflexions, les flux CLO nets traversant la toiture vitrée sont absorbés par les différentes parois selon le coefficient d'absorption de chacune.

**II.2.2.2. Le rayonnement thermique (GLO) :**

Les différentes surfaces internes chauffées par les flux solaires absorbés durant la journée échangent entre elles un rayonnement thermique grand longueur d'onde. Il y a transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique entre deux corps qui ne sont pas en contact i et j, de surface Si et Sj et de coefficient d'émission ε1 et ε2 lorsque leurs températures respectives sont différentes. La densité de flux net radiatif de grande longueur d'onde GLO est définie par la loi de Stefan-Boltzmann [Belmaaziz, 2003] :

$$\Phi_{GLO} = \frac{\sigma (T_i^4 + T_j^4)}{\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{i,j}} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j} \frac{S_i}{S_j}} \dots \dots \dots (1)$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5.67 10-8 W/m2.K4) et Fij, le facteur de forme entre la surface i et la surface j.

Les flux radiatifs GLO échangés entre les parois internes de l'atrium sont évalués en utilisant le même principe de multi-réflexions que pour les flux CLO.

II.2.2.3. Facteurs de forme :

Ce paramètre sans dimension, compris entre 0 et 1, traduit le rapport entre la quantité d'énergie qui quitte une paroi et qui atteint une autre et la quantité d'énergie totale qui quitte la surface. Ce quotient peut s'écrire :

$$F_{dA_i dA_j} = \frac{\text{Energie qui atteint } dA_j \text{ depuis } dA_i}{\text{Energie totale quittant } dA_i \text{ dans toutes les directions}}$$

Le facteur de forme obéit uniquement aux relations géométriques entre deux éléments qui se traduisent par l'angle solide sous lequel une surface émettrice voit une surface réceptrice. En d'autres termes, cela dépend de la distance qui les sépare l'un de l'autre et de leurs orientations relatives.

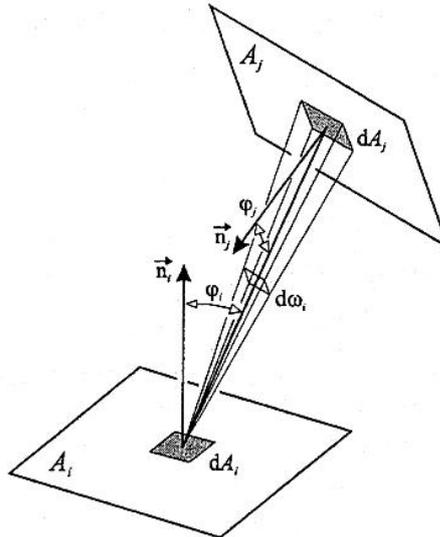


Figure II. 2 : géométrie des facteurs de forme entre deux éléments de surfaces élémentaires.

[Belmaaziz, 2003]

Le facteur de forme peut s'écrire de la manière suivante :

$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi.r^2} dA_i dA_j \dots\dots\dots (2)$$

Il est possible de déterminer ce paramètre à partir d'abaques pour des cas bien précis. Il existe d'autres techniques plus adaptées et optimisées pour les calculs numériques telles que les méthodes analytiques et les méthodes numériques [Miguet 2000]. Dans le contexte

de la thermique des atriums où la géométrie est souvent compliquée, il est indispensable que les facteurs de forme entre les éléments qui composent l'enveloppe soient calculés le plus précisément possible. D'eux dépend en grande partie le processus des multi-réflexions (GLO ou CLO). Des méthodes comme celles basées sur l'analogie de Nusselt [Groleau et al. 1992] ou une méthode par intégration de contour [Miguet 2000] semblent suffisamment adaptées aux problèmes traités dans l'étude des champs radiatifs. En effet, ces problèmes contrastent avec ceux rencontrés en imagerie lorsqu'il s'agit de produire des images réalistes nécessitant des procédures plus élaborées.

### II.2.3. Importance des échanges convectifs :

Parmi les transferts thermiques qui ont lieu dans un local, les échanges par convection sont sans doute les plus complexes à modéliser. C'est principalement par leur biais que l'air est chauffé dans le cas d'un atrium soumis à un fort ensoleillement. Le phénomène de convection apparaît lorsqu'un courant d'air, ayant pour origine une différence de densité due à une différence de température, se met en place. Dans ce cas, il s'agit de « convection naturelle ». Il arrive aussi que l'air se mette en mouvement grâce à une force externe imposée (mise en marche d'un ventilateur par exemple), dans ce cas le phénomène est désigné par le terme « ventilation forcée ». Les phénomènes de convection naturelle et forcée peuvent coexister. On parle alors de « convection mixte ». Les échanges sont d'autant plus importants que la vitesse de l'air est élevée. A proximité d'une paroi verticale, les échanges convectifs apparaissent lorsqu'il y a une différence de température entre la surface de la paroi et l'air ambiant. Une surface de paroi plus chaude que l'air génère des flux d'air ascendants. Au contraire une surface froide entraîne des mouvements d'air descendants. Pour une paroi horizontale, les schémas d'écoulement sont un peu plus compliqués et les régimes correspondants sont relativement instables [Crozet 1981]. La direction du flux (ascendant ou descendant) dépend des températures des surfaces supérieure et inférieure de la même paroi.

L'énergie échangée par convection ( $\varphi_{conv}$ ) entre les parois du local et l'air ambiant s'écrit :

$$\varphi_{conv} = h_c S (T_{paroi} - T_{air}) \dots \dots \dots (4)$$

Avec :

$h_c$  : Coefficient d'échange convectif,

S : surface de la paroi,

$T_{air}$ : Température de l'air,

$T_{paroi}$  : Température superficielle de la paroi.

Les échanges par convection font intervenir un coefficient d'échange convectif  $h_c$ . Celui-ci est déterminé en se basant sur des corrélations établies à partir d'études en ventilation naturelle et forcée sur des parois verticales et horizontales. Dans le cas de la convection naturelle, ce coefficient est exprimé à partir d'une différence de température qui existe entre la surface de la paroi et l'air. De nombreuses corrélations existent pour déterminer ce coefficient [Vinet 2000]. La corrélation généralement rencontrée est du type suivant :

$$h_c = a(T_{paroi} - T_{air})^n + b \dots \dots \dots (5)$$

Les valeurs de  $h_c$  dépendent des paramètres notés a, n et b. Cette corrélation conduit à des résultats satisfaisants à condition d'ajuster ces paramètres a, n et b en fonction des échanges convectifs à proximité de la paroi (verticale ou horizontale). Leurs valeurs varient selon les auteurs [Inard 1988] ce qui implique des différences importantes du coefficient  $h_c$ . En convection forcée ce coefficient est exprimé en fonction de la vitesse de l'air.

Des coefficients d'échanges convectifs normalisés peuvent être utilisés en convection naturelle comme le montre le tableau suivant :

**Tableau II. 1 : coefficients d'échanges convectifs en convection naturelle (Réglementation Thermique 2000)**

[Belmaaziz, 2003]

Sens du flux de chaleur	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)
Ascendant (plafond froid, plancher chaud)	5
Horizontal (sur parois verticales)	0.25
Descendant (plancher froid, plafond chaud)	0.7

**II.2.4. Importance de la conduction de la chaleur à travers les parois :**

Comme les autres transferts de chaleur que nous venons d'aborder, la conduction a sa part d'importance dans le processus complexe d'échange de chaleur. Plaçons-nous dans l'optique du transfert de chaleur à travers les parois délimitant l'atrium. Celles-ci sont souvent confrontées à diverses sollicitations. D'une part, l'ensemble de ces parois est soumis, durant la journée, aux flux solaires. D'autre part, parmi ces parois, celles qui délimitent le volume de l'atrium de celui des espaces adjacents sont en contact avec des ambiances qui sont généralement maintenues, durant la période d'occupation, à température constante. Le plancher quant à lui est le plus souvent en contact avec le sol. Enfin, certaines parois séparent l'atrium et l'extérieur. C'est le cas de la toiture par exemple. Du côté externe, en fonction de chaque paroi, la température des locaux adjacents, la température extérieure et la température du sol doivent être prises en compte pour la modélisation des transferts de chaleur par conduction dont nous serons amenés à traiter par la suite dans notre étude.

La densité de flux de chaleur transmis à travers un solide par conduction est proportionnelle au gradient de température. Suivant la loi de Fourier le flux s'écrit :

$$\vec{\varphi}_{cond} = - \lambda \cdot \overrightarrow{grad T} \dots\dots\dots(6)$$

$\lambda$  étant la conductivité thermique du matériau (W/m.K).

Si nous considérons que la conductivité thermique d'un solide est indépendante de la température, nous aboutissons à l'équation dite de chaleur ou équation de Fourier qui s'écrit sous la forme :

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \Delta T \dots\dots\dots(7)$$

$\rho$  étant la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) et  $c$  capacité calorifique massique (J/kg.K).

En posant  $a = \lambda / \rho \cdot c$  (coefficient de diffusivité thermique m<sup>2</sup>/s), nous pouvons écrire l'équation de Fourier sous la forme :

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(8)$$

En coordonnées cartésiennes, le laplacien de la température s'écrit :

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots(9)$$

Pour tout point du solide, ces équations permettent d'évaluer le champ de température et la densité de flux. La recherche de la solution pour chaque cas nécessite d'adjoindre des conditions aux limites et une condition initiale.

### II.2.5. La stratification des températures d'air :

La stratification thermique a été initialement étudiée dans des secteurs environnementaux tels que les lacs et l'atmosphère, où le fluide semble être segmenté verticalement dans des couches dépendant de son gradient de la température. Elle est maintenant de plus en plus étudiée dans les secteurs tels que le volume d'air interne de bâtiments avec le plafond haut [John Ashley ,2001].

La stratification d'un milieu se produit quand la densité de fluide dans le milieu ambiant est non-uniforme et varie avec la hauteur. Il surgit quand un corps chaud transfère l'énergie dans un milieu fermé faisant monter le fluide chaud, et la stratification du milieu résulte avec le fluide le plus chaud et le plus léger qui recouvre le fluide le plus froid et le plus lourd. Le flux de fluide qui résulte de la perte de chaleur du corps chaud monte au-dessus de lui pendant qu'un écoulement flottable et un recyclage coulent est installé. Si la chaleur est arrêtée, l'écoulement s'arrête avec une variation de température du milieu, avec un fluide plus léger au-dessus d'un fluide plus lourd.

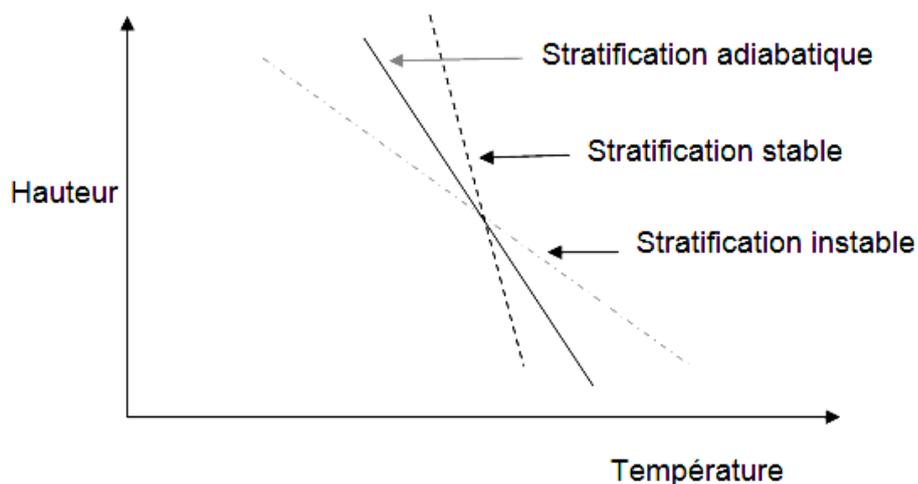


Figure II. 3 : représentation des conditions limites de stratification

[Juluria 1980]

Il y a trois types de stratification comprenant adiabatique, instable et stable. Si la température augmente avec la hauteur ou diminue à un taux moins que le taux adiabatique, alors la stratification stable résulte.

L'état de la stratification adiabatique représente l'équilibre neutre et une diminution de la température plus rapidement que cela a comme conséquence une stratification instable.

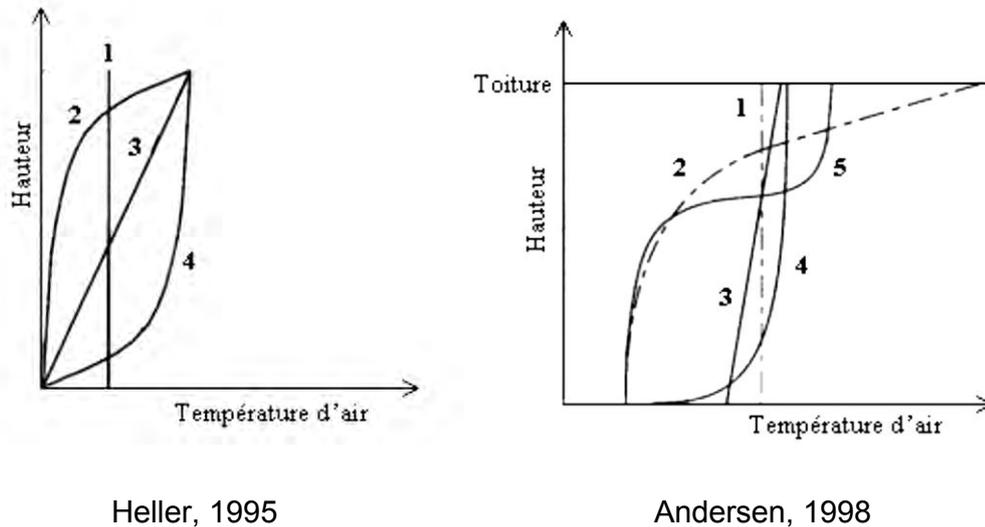
La stratification adiabatique se produit quand le milieu est dans un équilibre neutre, et il n'y a aucun changement de température en ce qui concerne la hauteur dans un fluide idéal. L'augmentation de la densité due à la diminution de la température est équilibrée par la diminution due à la diminution de pression en ce qui concerne la hauteur. S'il n'y a aucune stratification puis le volume d'air circule jusqu'à ce qu'une température d'équilibre soit atteinte.

La stratification instable se produit si un fluide chaud, plus léger se trouve au-dessous d'un fluide plus froid et plus lourd. La quantité de fluide léger déplace provoque un mouvement d'un fluide convecteur verticalement.

La stratification stable se produit quand le fluide plus chaud et plus léger se trouve au-dessus du fluide plus froid et plus lourd. La densité ( $\rho$ ) du fluide doit diminuer verticalement ( $x$ ),  $\frac{\partial \rho}{\partial x} < 0$ , aussi bien que la diminution comme la température ( $T$ ) augmente.  $\frac{\partial \rho}{\partial T} < 0$ , ce qui est vrai pour la plupart des fluides. Ceci a comme conséquence le rapport de la température ( $T$ ) augmentant verticalement ( $x$ ),  $\frac{\partial T}{\partial x} > 0$ . [Juluria 1980] [John Ashley ,2001].

Comme tout grand volume, les atriums sont susceptibles de connaître des champs de températures d'air non homogènes. Généralement cette hétérogénéité se traduit par des variations de températures entre les différentes zones du volume. Plus spécialement, cette variation se manifeste entre les parties inférieures et supérieures de l'atrium. Dans ce cas, il s'agit de stratification thermique verticale. Ce phénomène est de moindre importance dans les locaux classiques. Cependant, la hauteur importante d'un atrium ainsi que les apports d'énergie localisés tels que les flux solaires accentuent les variations verticales des températures d'air au point que celles-ci risquent de compromettre en été les conditions de confort selon l'endroit où l'on se trouve.

On rend compte de la stratification thermique dans un volume à travers le gradient vertical des températures d'air. Celui-ci peut prendre plusieurs allures en fonction de la localisation de la source de chaleur et du système de renouvellement d'air comme le montre la figure suivante :



**Figure II. 4: gradient vertical des températures d'air dans différents cas de figure**

Le profil 1 correspond au gradient vertical quand la température du volume est uniforme. Dans ce cas il n'y a pas de stratification. Cette situation théorique peut être approximativement obtenue quand la source de chaleur est uniformément répartie et que l'air dans le local est bien mélangé. Le profil 2 peut être obtenu lorsque la source de chaleur se trouve en partie haute. Dans ce cas les couches d'air chaud restent confinées près de la toiture. Le profil 3 concerne une stratification linéaire dans le cas où la chaleur est uniformément répartie et que le local est soumis à une ventilation par déplacement. Le profil 4 correspond à un gradient vertical qui peut être obtenu lorsque la source de chaleur est localisée en partie basse. Dans ce cas, le profil est convexe ce qui signifie que les températures d'air près du sol sont élevées comparées à celles des couches supérieures. Enfin, le profil 5 mentionné par Andersen peut être obtenu dans le cas où une source de chaleur se trouve à proximité de la toiture ou bien près des parois situées en partie haute.

Comme nous venons de le voir, à part la situation 1 où il n'y a pas de stratification, les quatre situations restantes correspondent aux profils généralement rencontrés dans un local et plus spécialement dans un atrium. Il est cependant nécessaire de s'intéresser de plus près aux gradients thermiques verticaux comme indicateurs thermiques qui

caractérisent un atrium en fonction de sa configuration, de la saison, du moment de la journée et l'organisation interne de l'espace.

### II.3. Caractérisation de la stratification thermique :

De nombreuses études consacrées aux atriums traitent de la stratification thermique. Parmi les plus intéressantes, nous avons choisi de présenter l'étude menée au Japon [Yoshino et al. 1995] car elle compare les gradients thermiques mesurés de quatorze atriums de nuit comme de jour pendant l'été et l'hiver. Signalons ici que les exemples traités ont des hauteurs pouvant dépasser parfois les 100 mètres sous verrière pour le cas des grands immeubles. Les différentes configurations étudiées sont illustrées par la figure suivante :

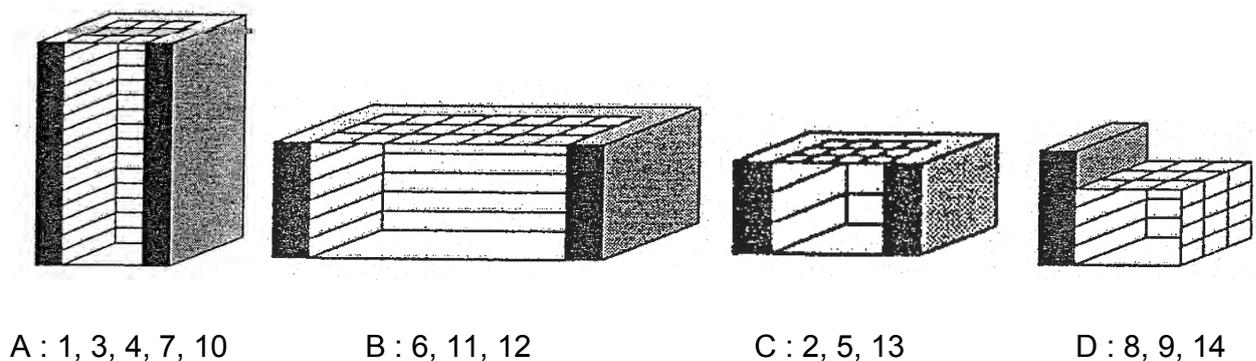


Figure II. 5: configurations des atriums étudiées par Yoshino

[Yoshino, 1995]

#### II.3.1. La stratification des températures d'air en été :

L'auteur a analysé pendant la saison estivale les gradients des différentes configurations à une heure critique de la journée à laquelle les flux solaires sont importants (13 h) et pendant la nuit (figure 6). Durant le jour il fait remarquer qu'en général les températures d'air les plus importantes sont enregistrées près de la toiture. Dans certains cas, elles dépassent les 50 °C. Même si les gradients répondent à des tendances identiques se rapprochant du profil concave (profil 2) ou bien à une stratification linéaire (profil 3), les écarts entre les températures en bas et en haut varient sensiblement. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait croire, les gradients verticaux des cas 1, 3, 7 et 10 (atriums à grandes hauteurs) sont les gradients les plus faibles. La raison avancée par l'auteur est que les flux solaires restent concentrés en haut près de la toiture et n'atteignent pas les niveaux inférieurs de l'atrium. Il avance aussi le fait que l'atrium soit entouré d'espaces climatisés.

C'est le cas aussi des configurations 5 et 12 qui sont, elles aussi, faiblement stratifiés à cause de la climatisation imposée aux espaces adjacents. Au sujet des atriums de grandes hauteurs, il est intéressant d'indiquer qu'une autre étude sur un atrium existant montre que la stratification dans ce genre de configuration est faible. En effet, en été dans un atrium d'environ 130 m de hauteur la différence de température verticale atteint à peine 6 à 7 °C [Kato et al. 1995] ce qui est très faible pour un atrium d'une telle hauteur.

Les cas dans lesquels à la fois le volume et la surface du sol sont importantes (cas 6 et 11) se caractérisent par des gradients de températures modérés alors que les atriums accolés (cas 8, 9 et 14) qui sont soumis à un fort ensoleillement se distinguent par des gradients très importants. L'auteur fait remarquer que le cas 2 correspondant à une configuration de faible hauteur qui est étudiée à part car l'évaluation du gradient en conditions normales est faussée par la climatisation du premier niveau de l'atrium. Dans cette situation, à l'exception du niveau bas, les autres niveaux sont caractérisés par un gradient assez élevé.

Durant la nuit, dans la majorité des cas, les différences de températures entre le haut et le bas sont relativement faibles. Les cas 9 et 12 se caractérisent tout de même par des gradients un peu plus prononcés que dans les autres volumes. Dans le premier cas il s'agit d'un atrium accolé. Sa configuration lui permet d'être soumis dès le début de la journée (à 7 h du matin) aux sollicitations solaires ce qui induit une hausse immédiate des températures d'air. Dans le second cas (cas 12), l'auteur précise que la présence du gradient est due au fait que les couches d'air supérieures demeurent assez chaudes à minuit au moment où ont été réalisées les mesures.

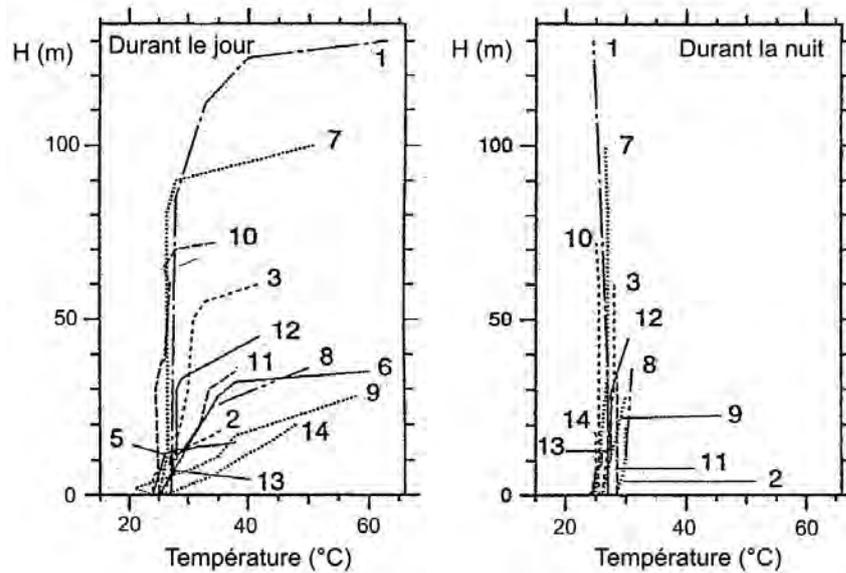


Figure II. 6: gradients verticaux des températures d'air pendant l'été

[Yoshino, 1995]

### II.3.2. La stratification des températures d'air en hiver :

Bien qu'il soit établi que les surchauffes et particulièrement la stratification sont des phénomènes que les concepteurs craignent plus l'été que l'hiver, nous allons tout de même brièvement aborder la question de la distribution verticale des températures durant l'hiver. Toujours en nous appuyant sur l'étude précédente, l'auteur montre que les gradients verticaux durant une journée d'hiver sont manifestement moins importants que ceux d'une journée d'été. Durant la nuit les tendances s'inversent par rapport aux gradients diurnes. En effet, les températures d'air n'augmentent pas mais diminuent légèrement en gagnant de la hauteur. Ceci traduit bien les effets des vitrages zénithaux froids qui ont tendance à être des parois à fortes déperditions thermiques.

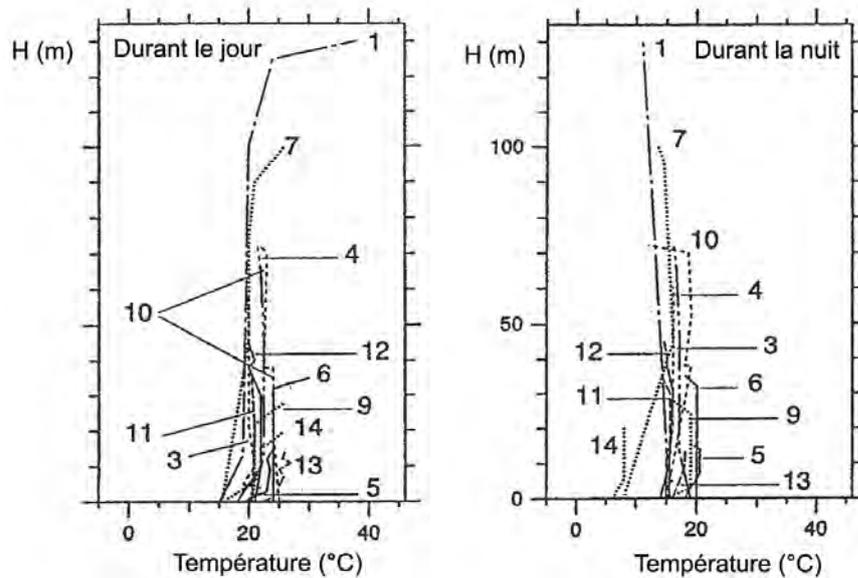


Figure II. 7 : gradients verticaux des températures d'air pendant l'hiver

[Yoshino, 1995]

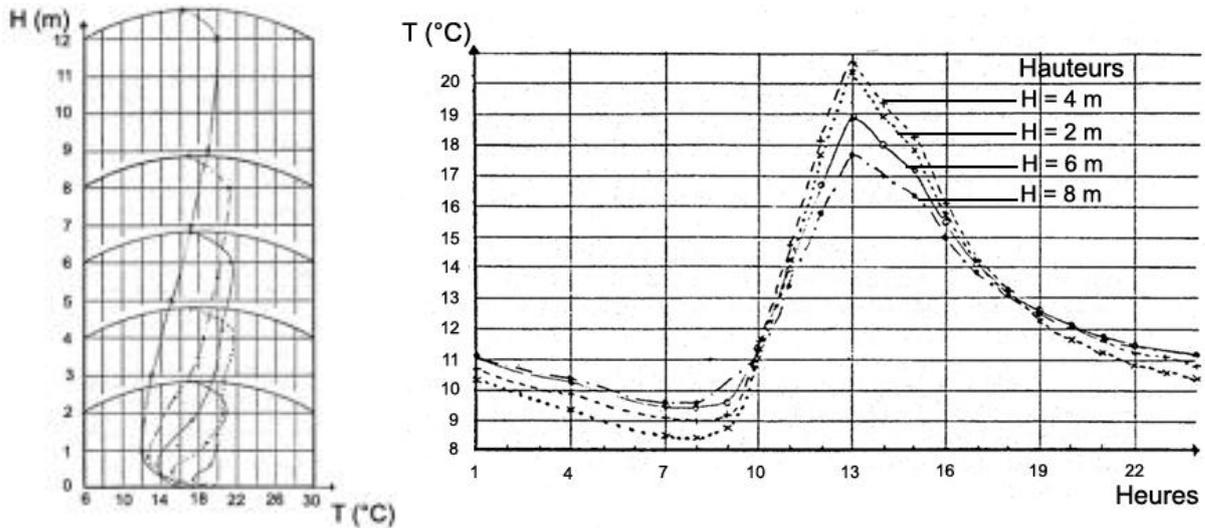
### II.3.3. Effets des dimensions de l'atrium sur la stratification :

Nous avons vu précédemment que la stratification est tributaire de la configuration de l'atrium surtout durant l'été. Intéressons-nous maintenant aux effets des dimensions de l'espace sur la distribution verticale des températures. Pour cela, nous présenterons deux études différentes effectuées dans ce sens. La première s'intéresse à l'influence de la hauteur sur la stratification. La seconde compare les résultats de deux analyses menées dans deux atriums de largeurs différentes.

#### II.3.3.1. Effets de la hauteur :

Les effets de la hauteur sur la stratification ont indirectement été abordés plus haut au travers des différences de hauteurs des volumes analysés. Certes, il s'agissait d'atriums de hauteurs inégales mais les configurations étudiées sont différentes de par leurs géométries. Une étude traitant de ce problème a été entreprise par Crozet [Crozet 1981]. Dans le cadre de sa thèse, celui-ci s'est intéressé aux effets de la variation de la hauteur, pour une largeur constante, sur la stratification thermique. Des simulations ont été effectuées sur une galerie couverte en faisant varier la hauteur sous-toiture à 13 h durant une journée d'hiver. Ces variations, qui vont de 3 à 12 m, montrent que les températures en bas de la galerie ont tendance à diminuer quand la hauteur augmente. Les températures en haut restent sensiblement les mêmes dans toutes les situations. Elle est même légèrement inférieure

dans le cas le plus haut. L'auteur définit une hauteur optimale à laquelle la température maximale est atteinte. Celle-ci est de l'ordre de 4 m.



**Figure II. 8 : à gauche, gradients verticaux pour diverses hauteurs dans la galerie alors que la largeur reste constante. A droite, évolution des températures en fonction de la hauteur**

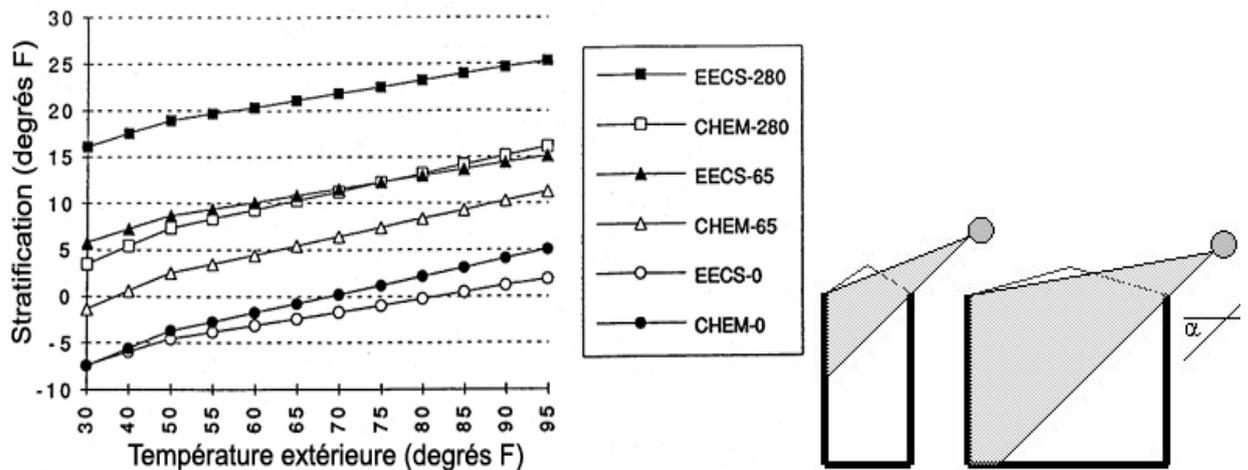
[Crozet, 1981]

**II.3.3.2. Effets de la largeur :**

Pour montrer les effets de la largeur sur la stratification nous nous appuyerons sur une étude menée dans deux atriums de volumes presque similaires (de l'ordre de 18000 m<sup>3</sup>) mais de largeurs différentes (9 m pour le premier contre 28 m pour le second). Des corrélations ont été établies à partir de mesures effectuées dans les deux atriums. Elles ont permis de prédire les différences de températures entre le haut et le bas de chaque configuration. Ces corrélations font intervenir quatre paramètres : la température de l'air extérieur, la hauteur du soleil, le rayonnement solaire global et la vitesse du vent [Jones et al. 1993].

A travers les résultats obtenus, les auteurs font remarquer que la différence de température entre le haut et le bas augmente à la fois lorsque la température extérieure et le rayonnement solaire augmentent. Quand le rayonnement solaire est nul (indice 0 sur la légende du graphe) et que la température extérieure est basse, le gradient est souvent négatif (Figure II.9), c'est à dire qu'il fait plus froid près de la verrière. A l'opposé, le gradient devient positif dès que les températures extérieures et le rayonnement solaire augmentent.

De la comparaison entre les résultats des simulations effectuées sur les deux configurations, il ressort que l'atrium étroit est caractérisé par une importante stratification par rapport à l'atrium large. Lorsqu'il y a un fort ensoleillement (indice 280), la stratification dans l'atrium étroit est plus importante de 12 °C par rapport à l'atrium large. Pour expliquer cela, les auteurs avancent le fait que l'atrium étroit serait, de par ses proportions, soumis au rayonnement solaire uniquement dans sa partie haute. C'est tout le contraire pour l'atrium large où les pénétrations solaires sont bien plus importantes et les zones chauffées sont réparties sur toute la hauteur (Figure II.9).



**Figure II. 9: à gauche, la comparaison des gradients thermiques en fonction de la température extérieure et du rayonnement solaire. A droite, les pénétrations solaires dans les deux atriums**

[Jones, 1993]

Les valeurs des gradients thermiques horaires ont eux aussi fait l'objet d'une analyse. Quelle que soit la saison, cette dernière fait ressortir que les gradients de l'atrium étroit sont toujours supérieurs à l'atrium large. Par ailleurs, d'autres corrélations dérivées des premières ont permis d'établir cette fois-ci les changements de la température moyenne de l'atrium pour diverses hauteurs. Cela revient à calculer les variations de températures en fonction de la hauteur, à la différence des gradients précédents qui représentent une différence de température entre deux points (bas et haut) ce qui ne permet pas de donner l'allure des gradients. La figure suivante présente les résultats obtenus. Nous pouvons constater un changement de l'allure du gradient à partir d'une hauteur de 14,6 m dans le cas de l'atrium étroit. Jusqu'à cette hauteur nous assistons à une progression linéaire de température. Au-delà, le gradient est plus prononcé puisque c'est dans cette partie que la

tache solaire est localisée. Dans le cas de l'atrium large, ce point de transition dans le comportement n'est pas aussi marqué. La stratification se fait graduellement avec la hauteur car, d'après les auteurs, une large répartition de la tache solaire ainsi qu'un bon mixage de l'air favorisent probablement un tel comportement.

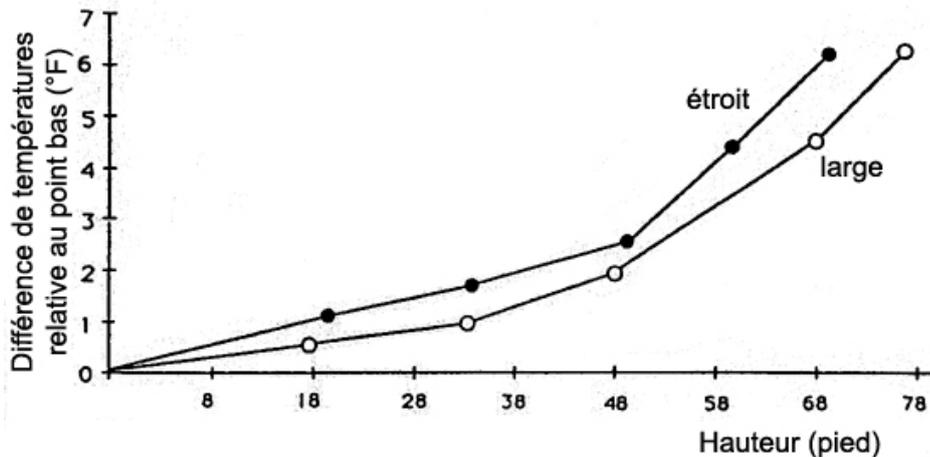


Figure II. 10: gradients thermiques verticaux dans les deux atriums

[Jones, 1993]

#### II.3.4. Effets de l'organisation interne de l'atrium sur la stratification :

Après avoir abordé l'influence que peuvent avoir certains aspects dimensionnels sur la distribution verticale des températures, intéressons-nous à présent aux effets que peut engendrer l'organisation intérieure de l'atrium sur la stratification. Comme nous l'avons déjà abordé lors de l'analyse typologique, l'organisation intérieure est un aspect important qui différencie un atrium lisse (sans coursives) d'un atrium alvéolaire (avec coursives). Dans notre recherche bibliographique, la seule étude que nous avons trouvée qui traite de cet aspect est une analyse comparative effectuée par le laboratoire ABC [Belmaaziz, 2003]. Ce travail consistait à comparer les résultats de mesures effectuées dans trois atriums situés en France. Il s'agit des deux atriums partiellement alvéolaires des Ecoles d'Architecture de Marseille et de Lyon (notés EAML et EAL) et celui de l'Hôtel du département à Marseille (noté Hôtel 13), qui est quant à lui, totalement lisse. Les journées pendant lesquelles les mesures ont eu lieu sont des journées ensoleillées et présentent les températures moyennes extérieures suivantes : pour l'atrium de l'EAML les températures mesurées étaient de 19 et 22 °C. Pour le cas de l'EAL et de l'Hôtel 13 elles étaient de 24,5 et 26 °C. Le tableau suivant résume la comparaison entre les gradients totaux et unitaires

correspondants à chaque atrium en fonction de la température extérieure. Le gradient unitaire est obtenu simplement en divisant le gradient total sur la hauteur entre le point le plus bas pour monter l'intensité des variations.

**Tableau II. 2 : comparaison entre les gradients verticaux des trois atriums étudiés**

[Belmaaziz, 2003]

Atrium	T extérieures moyennes (°C)	Gradient vertical (°C)	
		total	unitaire
EAML	19	3.25	0.31
EAL	19	1.8	0.35
EAML	22	2.9	0.28
EAL	22	1.35	0.46
Hôtel 13	24.5	1.8	0.08
EAL	24.5	6.29	0.5
Hôtel 13	26	1.5	0.07
EAL	26	5	0.47

L'analyse des gradients thermiques des atriums de l'EAML et de l'EAL montre que les gradients unitaires sont presque du même ordre (0,3 à 0,5 °C/m) avec des gradients unitaires un peu plus élevés pour le cas de l'EAL. Au contraire, le gradient vertical total est toujours plus important que celui de EAL. Les auteurs tentent d'expliquer cela en mettant en avant le fait que la configuration de l'atrium de EAML soit plus alvéolaire que l'autre. L'atrium de l'EAML compte effectivement deux coursives qui découpent le volume en trois alvéoles alors que celui de l'EAL ne comporte qu'une coursive qui découpe le volume en deux parties seulement.

Pour appuyer leurs propos, à savoir que le caractère alvéolaire d'un volume favorise la stratification, les auteurs ont comparé les résultats de deux atriums de configurations différentes. L'un est alvéolaire (EAL), l'autre est lisse (Hôtel 13). Dans ce cas, les écarts entre les gradients sont manifestes. Les gradients verticaux unitaires sont dans un rapport d'environ 1 à 6 et les gradients totaux dans un rapport de 1 à 3,5 au profit de ceux de l'atrium de EAL. La comparaison entre le comportement de deux configurations a le mérite de montrer les variations verticales des températures en fonction de la configuration interne du volume. Cependant, si les deux premiers atriums alvéolaires ont une taille comparable, il

n'en est pas de même pour l'atrium de l'Hôtel 13 qui lui est un atrium lisse quatre fois plus large et deux fois plus haut que les atriums de l'EAML et l'EAL. Même si les résultats tendent à montrer que l'alvéolarité a une influence sur le gradient, la comparaison est difficile à établir entre des volumes de tailles sensiblement différentes.

Constatant que l'approche par la mesure ne permettait d'apporter qu'une réponse partielle aux aspects liés à l'alvéolarité, vu les problèmes de taille correspondants aux atriums mesurés, les auteurs ont entrepris une analyse plus large par la simulation numérique visant en partie à éclaircir la relation qui lie l'organisation interne et le comportement thermique. [Belmaaziz, 2003]

Une série de simulation a été menée avec un outil performant mais lourd en utilisation. Il s'agit du code de mécanique des fluides FLUENT. Les auteurs ont simulé les températures et les vitesses d'air dans des atriums de tailles similaires, l'un étant lisse, l'autre étant alvéolaire. L'analyse des résultats fait ressortir des différences clairement identifiables entre les deux configurations. En effet, à 13 h (heure solaire) en pleine saison estivale, pour un atrium en béton dont la toiture est totalement vitrée, le gradient thermique pour le cas lisse est de 2,6 °C contre 3,6 °C pour l'alvéolaire. Lorsque les parois sont en verre, le gradient est plus important puisqu'il est de 5,2 °C pour le cas alvéolaire alors qu'il est de seulement de 0,6 °C pour l'atrium lisse. Notons que les résultats que nous présentons ont été obtenus avec un taux de renouvellement d'air faible de l'ordre de 0,5 Vol/h.

Enfin, si ces simulations tentent d'éclaircir l'influence de l'alvéolarité sur la stratification thermique, elles sont cependant contestables sur au moins deux points : d'une part, ces simulations ont été menées en 2D en supposant que les atriums simulés étaient des configurations linéaires. Autrement dit, les auteurs ont considéré que le comportement thermo-aéraulique se réduisait à une section de l'atrium ce qui implique que les effets des mouvements d'air transversaux ne sont pas pris en compte. Certes cela peut être admis lorsque nous avons affaire à des taux de renouvellement faibles mais dès que les débits sont importants cette hypothèse du calcul en 2D devient incertaine. D'autre part, il est impératif dans le cas d'un atrium de tenir compte, comme nous l'avons déjà vu, de la répartition de la tache solaire sur les parois internes. Or, il semblerait que les simulations ont été conduites en considérant les flux solaires comme répartis de manière homogène sur toutes les parois. Cela a sans doute une influence sur la pertinence des résultats

obtenus. Pour ces deux raisons essentielles, l'influence de l'alvéolarité mérite donc d'être un peu plus approfondie en utilisant des moyens plus adaptés.

### II.3.5. Influence d'autres paramètres sur la stratification :

Les études que nous avons abordées nous ont permis de mettre en avant les relations qui existent entre certains aspects dimensionnels et d'organisation sur la stratification. Par ailleurs, nous s'avons pu rencontrer d'études traitant explicitement de la relation entre le climat, l'inertie des parois, Les cavités des murs de l'enveloppe de bâtiment, Les matériaux de toiture et le taux de vitrage zénithal sur la stratification. De ce fait, nous pouvons évoquer deux études consacrée au comportement global de l'atrium et qui traite de ces paramètres [Atif 1995, Arvind Devikar 2001]. Que nous pouvons considérer comme essentiels, sans aller jusqu'à qualifier les phénomènes de stratification. Les études en question a pour objectifs d'étudier:

- le comportement thermique des atriums et notamment les corrélations entre les paramètres physiques (caractéristiques thermiques et dimensionnelles), les conditions climatiques et leurs réponses thermiques en se basant sur un comportement moyen à travers l'amplitude thermique. Celle-ci représente la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de température intérieure de l'atrium sur 24 heures [Atif 1995].
- Et l'impact des aspects suivant sur le comportement thermique des atriums [Arvind Devikar 2001]:
  - Les matériaux de toiture.
  - Les cavités des murs de l'enveloppe de bâtiment.
  - L'isolation de toit pour les volumes autour d'atrium.
  - Les conditions de confort dans l'atrium pendant l'été.

Pour ce qui de la 1<sup>er</sup> recherche [Atif 1995]. C'est grâce à la simulation numérique effectuée avec le logiciel TRNSYS, les auteurs ont testé l'influence des paramètres suivants sur le comportement thermique :

- la masse thermique des parois de l'atrium

- le pourcentage de vitrage zénithal (ici 100% et 50% de la surface de la couverture zénithale)

Ces paramètres ont été testés pour deux climats différents : celui d'Ottawa au Canada (latitude 45,5° N, climat froid) et celui de Fresno en Californie (latitude 36,8° N, climat chaud). Les simulations thermiques effectuées tiennent compte les gains solaires transmis par les vitrages, les transferts de chaleur par conduction (d'une part entre l'extérieur et l'intérieur de l'atrium, de l'autre entre l'atrium et les locaux adjacents) et les transferts de chaleur dus à la ventilation. Les températures d'air ainsi que les flux thermiques transmis par les parois (séparant l'atrium des locaux adjacents) ont été calculés à pas horaire pour une journée d'été (le 21 juin). Les simulations ont été effectuées en faisant varier l'inertie thermique des parois comme le montre le tableau suivant :

**Tableau II. 3 : caractéristiques des parois testées**

[Atif 1995].

Type de parois	Conductivité thermique (W/m <sup>2</sup> . °C)	Masse thermique des parois (kg/m <sup>2</sup> )
parois très légères	2,210	14
parois légères	2,972	54
parois lourdes	2,947	366

#### II.3.5.1. Influence de la surface vitrée :

Pour un climat froid, dans le cas d'une faible inertie thermique, la réduction de la surface du vitrage zénithal de 50 % abaisse l'amplitude de température dans l'atrium de 6,1 °C pour le climat d'Ottawa. Dans le cas d'une forte inertie thermique, la même réduction de la surface du vitrage réduit l'amplitude de température de 2,2 °C et ne réduit la température maximale que de 1,6 °C. La réduction de la surface vitrée zénithale a aussi pour conséquence de diminuer les apports de chaleur entre l'atrium et les locaux adjacents. Ils sont de 60 % pour le cas de la faible inertie et de 40 % pour la forte inertie.

Dans le cas d'un climat chaud, les profils des températures d'air dans l'atrium sont relativement similaires à ceux obtenus pour Ottawa sauf que les températures d'air sont plus élevées. Cela est dû à des températures extérieures et à des apports solaires plus significatifs en été. Lorsque l'inertie des parois est faible, la réduction de la surface vitrée de

50 % abaisse l'amplitude de 9,4 °C, la température maximale pendant la journée de 10 °C et les apports de chaleur de 40 %.

### II.3.5.2. Influence de l'inertie :

L'accroissement de l'inertie thermique des parois réduit l'amplitude diurne des températures dans l'atrium et la température maximale d'air. Pour un climat chaud (Fresno), les auteurs font constater que la multiplication de la masse thermique des parois par un facteur 7 abaisse l'amplitude pendant la journée de 9,4 °C. La réduction du taux de vitrage de 50 % permet d'obtenir à peu près le même effet puisque l'amplitude est de 10,6 °C. Cela n'est pas le cas pour un climat froid (Ottawa) où l'équivalence entre l'incidence de l'augmentation de masse thermique et le taux de vitrage est moins marquée. En effet, lorsque la masse thermique des parois est forte l'amplitude thermique est de 3,3 °C contre 5,6 °C lorsque la toiture est vitrée de moitié. Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

**Tableau II. 4 : comparaison des amplitudes thermiques pour le cas d'un atrium central, la température minimale étant de 24,4 °C**

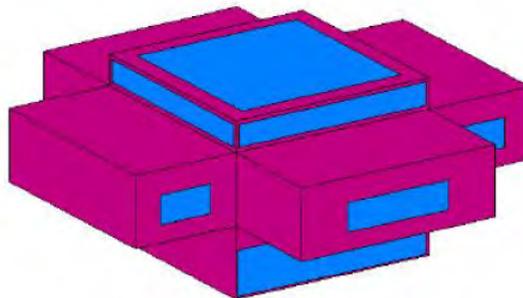
[Atif et al. 1995]

Climat	Masse thermique des parois (kg/m <sup>2</sup> )		Taux de vitrage zénithal	
			100 %	50 %
Chaud (Fresno) (°C)	faible	54	20	9.4
	forte	366	10.6	5.6
Froid (Ottawa) (°C)	faible	54	9.4	5.6
	forte	366	3.3	2.8

Nous voyons à quel point l'influence de l'inertie des parois, et du taux de vitrage zénithal, sont importants à prendre en compte dans la perspective du bon fonctionnement thermique de l'atrium. Les auteurs relèvent le fait que dans les régions froides on favorise plus la lumière du jour que l'atrium peut procurer. Les architectes et les ingénieurs ont donc tendance à ne pas réduire la surface vitrée zénithale mais plutôt à augmenter l'inertie des parois pour remédier à des problèmes de surchauffe. Au contraire, dans le cas d'un climat chaud, la réduction de la surface vitrée est un peu plus efficace que l'augmentation de la masse thermique. La réduction de la surface vitrée est donc recommandée. Toutefois, on peut augmenter la masse thermique si plus de transparence dans l'atrium est exigée.

Pour conclure à propos de cette étude, nous insistons sur le fait que les auteurs se soient appuyés sur des résultats moyens pour rendre compte de l'influence du taux de vitrage et de l'inertie (par rapport au climat) sur le comportement thermique. Ils ne vont pas jusqu'à décrire les distributions des températures d'air, qui comme nous l'avons évoqué, doivent être considérées dans la perspective de l'analyse du comportement thermique. Cependant, les variations entre les résultats moyens obtenus laissent penser que les deux paramètres constructifs étudiés ont forcément un impact sur la stratification thermique.

Pour ce qui est de la 2<sup>ème</sup> recherche [Arvind Devikar 2001], c'est grâce à la simulation numérique effectuée avec le logiciel Derob-lth (Dynamic Energy Response of Buildings), les auteurs ont testé l'influence des paramètres précédemment cités sur le comportement thermique. La simulation est faite pour un projet qui était dans une étape de conception, un bâtiment (complexe de bureaux) situé dans le secteur institutionnel de Gomtinagar Lucknow en Inde. Caractérisé par un climat composé. (Trois types de climat durant toute l'année. Ils sont chauds et secs durant avril à juin, chauds et humides à partir de juillet à septembre, et froid à très froid du décembre à janvier). [Arvind Devikar 2001]



**Figure II. 11: Modèle de projet**

[Arvind Devikar 2001]

Le bâtiment est presque de forme carrée. L'atrium est situé au centre du bâtiment. Les activités principales sont orientées vers le sud. Le plan complexe de bâtiment est modifié à une forme plus simple par raison de la simulation. (Figure 11) (Le dôme sphérique transparent proposé sur l'atrium est simplifié à la forme plate sans changer la superficie par défaut que le programme ne peut pas simuler la forme sphérique).

La simulation est faite suivant plusieurs cas d'étude :

Tableau II. 5 : les cas de simulation

[Arvind Devikar 2001]

Les cas	Spécification
Cas 1 : (le cas de base)	Simulation durant le mois de Mai Orientation N-S Hauteur sous plafond (normal) 3.2m Hauteur sous plafond (atrium) 7.8m Epaisseur du mur de brique 230mm couleur de la façade clair toit et plafond non isolé toiture en verre 1 renouvellement (charge interne 1500wh/h durant la période d'occupation et 200wh/h durant la période de non occupation)
Cas 2	+Simulation en juin
Cas 3	+ Simulation en Août
Cas 4	+ polycarbonate pour la toiture de l'atrium
Cas 5	+ Conc. pour la toiture de l'atrium
Cas 6	+isolation avec le polystyrène pour les volumes entourant
Cas 7	+isolation + brique creux pour les murs de l'enveloppe

### II.3.5.3. Influence des cavités des murs de l'enveloppe et les matériaux de toiture :

Comme conclusion de ce travail de recherche on a dans le mois de Mai (été maximal), la température à l'intérieur de l'atrium est plus que la température extérieure. La performance thermique des matériaux de toiture, le verre est meilleur que le polycarbonate. L'isolation de toit et la construction avec des cavités des murs des autres volumes ne font pas beaucoup d'impact positif sur la température de l'atrium. et L'augmentation de la température d'atrium fait transfère la chaleur aux volumes environnants pendant 10-18 heures. Et c'est le facteur négatif de la performance de l'atrium en été.

#### II.3.5.4. Influence de l'orientation :

L'un des paramètres que l'architecte est sensé manipuler en tout début du projet concerne l'orientation du bâtiment. De celle-ci vont dépendre les conditions d'ensoleillement des parois internes de l'atrium. Comme pour les deux paramètres étudiés plus haut, nous n'avons pas trouvé d'études consacrées à l'influence de l'orientation sur la stratification thermique. Dans les travaux que nous avons pu rencontrer, les auteurs se contentent d'étudier l'atrium sous une seule orientation. Citons néanmoins l'étude de Wall qui visait à étudier l'influence de l'orientation sur le comportement thermique sur une géométrie d'atrium [Wall 1996]. L'auteur montre que des expositions différentes d'ensoleillement peuvent conduire à des différences de température d'air non négligeables d'une orientation à une autre.

Vu le peu d'informations que nous apporte cette étude et l'absence de travaux clairement dédiés à l'impact de l'orientation du volume vitré sur la stratification, ce paramètre mérite d'être donc approfondi, surtout, sachant que la distribution de la tâche solaire varie sensiblement d'une géométrie à une autre.

#### II.4. Conclusion :

Nous avons consacré ce chapitre à établir un état de l'art sur tout ce qui concerne les aspects relatifs au comportement thermique des atriums. En premier lieu nous avons essayé de montrer en quoi le comportement des atriums est différent de celui des autres espaces et quels sont les phénomènes qu'il est impératif de prendre en compte dans l'optique d'une modélisation des paramètres physiques qui régissent le comportement de l'ambiance thermique. Cela nous servira plus tard quand il s'agira d'entreprendre des travaux de simulation.

Par la suite, nous nous sommes intéressé à la stratification thermique, qui est un phénomène auquel nous sommes systématiquement confrontés dans un grand volume surtout quand celui-ci est largement vitré. Ce phénomène est souvent perçu comme un problème car, quand il est présent, il conduit inévitablement à un inconfort selon où l'utilisateur se trouve dans le volume. A travers l'exploration des travaux que nous avons pu trouver traitant du comportement climatique des atriums, nous avons essayé dans un premier temps de caractériser la stratification à partir de l'analyse, de jour comme de nuit et en fonction des variations saisonnières, des gradients thermiques verticaux. En suivant une

logique analogue, nous avons tenté de faire ressortir les paramètres qui semblent avoir une influence sur la stratification. Les paramètres identifiés relèvent à la fois des aspects dimensionnels (hauteur et largeur du volume), de l'organisation interne (atrium lisse ou alvéolaire) et de paramètres constructifs (taux de vitrage zénithal, constitution des parois, orientation du bâtiment). Cela peut nous aider à mieux comprendre en quoi consistent les études dans ce domaine et quelles sont les préoccupations par rapport au sujet que nous traitons.



**...Caractérisation  
des ambiances aérauliques  
dans les atriums**

### III.1. Introduction :

Suite à notre recherche menée sur les caractérisations des ambiances thermiques dans les atriums établie dans le chapitre précédent, il est important de s'intéresser aux aspects liés aux mouvements d'air qui constitue l'ambiance aéraulique dans les atriums.

Nous aborderons donc les techniques de contrôle des ambiances climatiques en nous attachant sur le cas de la ventilation naturelle. En dernier lieu, nous nous intéresserons aux techniques de modélisation des phénomènes thermo-aérauliques des grands volumes. Enfin, nous ferons une synthèse des études que nous avons pu recueillir lors de notre recherche bibliographique.

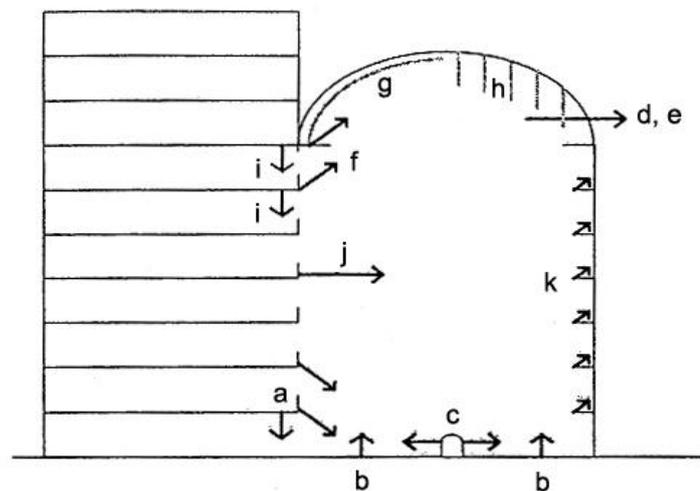
### III.2. Stratégies de ventilation adoptées dans les atriums :

La ventilation est un paramètre majeur à prendre en compte dans la conception d'un atrium. Comme tout grand volume soumis à une occupation fréquente, l'atrium peut être le lieu de concentrations de divers polluants (fumées, odeurs ...). Le système de ventilation doit donc en premier lieu être capable d'assurer un renouvellement d'air permettant d'évacuer l'air pollué. Au-delà de cette considération hygiénique, la ventilation, si elle est utilisée à bon escient, peut résoudre certains problèmes d'ordre thermique spécialement en été.

Les phénomènes de surchauffe et de stratification abordés précédemment peuvent être évités, ou du moins réduits. Pour cela, un renouvellement d'air adéquat doit être assuré. Il est cependant vrai qu'un certain nombre d'atriums existants sont souvent climatisés ou appartiennent à des bâtiments qui sont eux-mêmes climatisés. Bien entendu, cette solution de rafraîchissement permet d'assurer le confort thermique des occupants. En revanche, la climatisation est souvent synonyme de surconsommations d'énergie surtout lorsqu'il s'agit, comme c'est souvent le cas, de conditionner la totalité du volume ou de rattraper des erreurs de conception qui auraient pu être évitées. La ventilation reste une alternative bien plus prometteuse pour l'amélioration des conditions de confort. Le renouvellement d'air permet de jouer le rôle de caloporteur en évacuant l'air chaud généré à l'intérieur de l'atrium. La ventilation peut être gratuite en coût énergétique si elle est naturelle. Elle peut aussi être mécanique. Dans ce cas elle constitue un facteur de consommation d'énergie qu'il faudra contrôler pour éviter les surcoûts d'énergie.

En abordant le rafraîchissement dans les atriums, l'aspect dimensionnel qui les caractérise refait surface. Comme nous l'avons déjà évoqué, nous n'avons pas ici affaire à des locaux de petite taille où un système de ventilation (naturelle ou mécanique) conventionnel suffit à maîtriser l'ambiance thermique. Réguler cette dernière dans un grand volume nécessite de gérer des aspects liés à la circulation de l'air. En effet, les courants d'air qu'entraîne la ventilation doivent être étudiés de manière à ce que les champs de vitesses ne constituent pas, dans les zones fréquentées, une source d'inconfort pour les occupants. Ceci est un aspect important à prendre en considération surtout lorsque la grande taille du volume est associée à une configuration géométrique compliquée.

Il existe plusieurs stratégies de ventilation appliquées aux cas des atriums. Les plus couramment employées sont résumées par Yoshino dans le schéma suivant :



**Figure III. 1: stratégies de contrôle des ambiances thermo-aérauliques dans un atrium**

[Yoshino et al. 1995]

Dans son étude exploratoire sur certains atriums existants, l'auteur rassemble les méthodes adoptées pour le contrôle des ambiances thermo-aérauliques selon quatre groupes. Le premier concerne le traitement réservé aux zones habitables au niveau du plancher bas. Dans ce groupe trois méthodes sont recensées : *a*, *b* et *c*. La méthode *a* consiste à diffuser de l'air frais conditionné à partir du plancher ou d'un mur du premier niveau. La méthode *b* permet de rafraîchir l'atrium à l'aide d'un plancher (sol) réversible qui sert aussi au chauffage. La méthode *c*, quant à elle, est une méthode de contrôle pour un rafraîchissement localisé.

Le deuxième groupe comprend trois méthodes pour traiter l'air chaud qui s'accumule sous la toiture : *d*, *e* et *f*. La méthode *d* sert à l'évacuer par ventilation naturelle à travers les ouvrants disposés à proximité de la toiture. La méthode *e* sert à l'extraire au même endroit par ventilation mécanique. Il est aussi possible de se servir de ventilateurs (méthode *f*) pour évacuer l'air chaud qui s'accumule dans les parties habitables aux niveaux supérieurs.

L'auteur ne s'arrête pas au recensement des méthodes de rafraîchissement par la ventilation. Il évoque aussi deux méthodes de contrôle solaire permettant de réduire les gains de chaleur à l'intérieur de l'atrium. Ces deux méthodes (*g* et *h*) constituent le troisième groupe.

Enfin, le dernier groupe inventorie l'ensemble des autres stratégies (*i*, *j* et *k*) susceptibles d'être rencontrées. La méthode *i* consiste à réaliser un rideau d'air afin de séparer l'atrium des espaces adjacents lorsque ceux-ci donnent directement vers l'atrium. La méthode *j* adopte le même principe, mais cette fois-ci le rideau d'air est horizontal de sorte à empêcher l'air des premiers niveaux d'atteindre la partie haute de l'atrium. La méthode *k* est un traitement particulier de diffusion d'air chaud réservé au vitrage en saison hivernale afin d'éviter les condensations.

L'auteur précise que, dans la majorité des cas, des ouvrants en partie haute sont prévus pour favoriser la ventilation naturelle. Dans une moindre mesure, les concepteurs ont recours à la ventilation mécanique. Ces deux stratégies ne sont pas employées seules. Elles sont souvent associées aux autres stratégies énumérées plus haut. En fonction de la configuration et du mode d'occupation de l'atrium des traitements localisés peuvent renforcer l'amélioration des conditions de confort dans ces zones. Par ailleurs, selon le rapport ASTER [Lomas et al. 1995], les auteurs font remarquer qu'il est possible de rafraîchir un atrium uniquement par ventilation naturelle si celle-ci est soigneusement étudiée. Cela dépend des conditions climatiques (climats modérés)

En laissant d'emblée de côté la climatisation comme mode de rafraîchissement, intéressons-nous de plus près à la ventilation naturelle comme mode passif de renouvellement d'air qui peut être favorisé par rapport aux autres techniques.

### III.2.1. La ventilation naturelle :

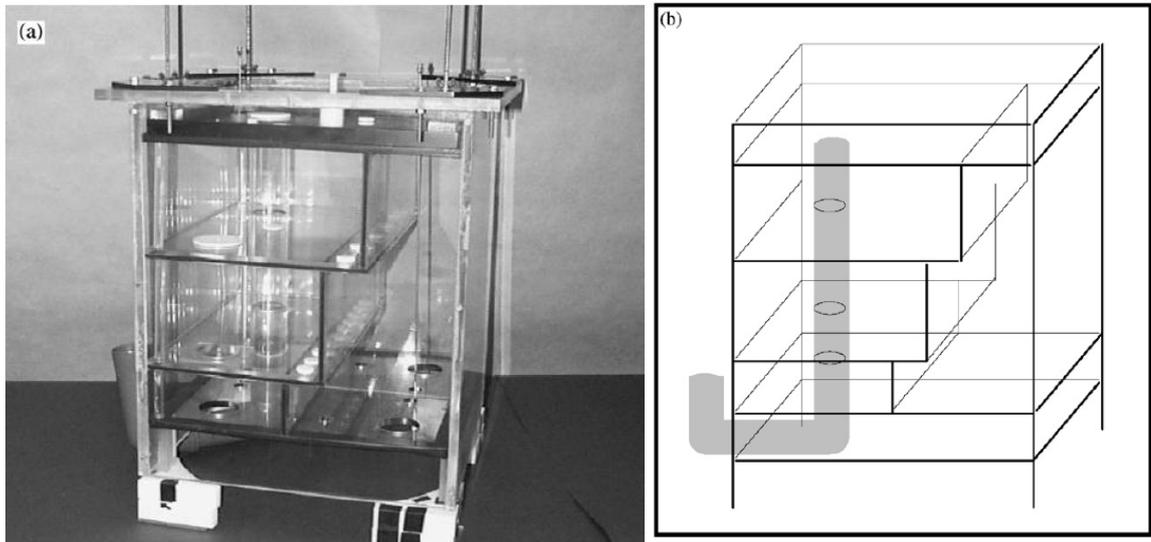
La ventilation naturelle est une stratégie adoptée pendant la saison estivale pour réduire les gains thermiques et par là-même abaisser les températures internes de sorte qu'elles s'égalisent avec les températures extérieures. Le principe de fonctionnement de cette stratégie consiste à remplacer l'air interne chaud par de l'air frais provenant de l'extérieur. Ce renouvellement d'air gratuit peut avoir pour force motrice les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur, dans ce cas il s'agit de ventilation naturelle par tirage thermique. Le renouvellement d'air peut aussi être occasionné par les différences de pressions sous l'effet du vent.

Si la ventilation naturelle est connue pour être une technique plus appréciée par rapport aux autres méthodes de rafraîchissement, elle est à plusieurs titres compliquée à mettre en œuvre. D'une part, les forces motrices (différence de température et vent) dépendent d'une multitude de paramètres qui interagissent entre eux. La taille des bouches d'air, leurs emplacements, les vitesses d'air générées sont autant de paramètres à considérer. En plus de ces aspects d'ordre technique, l'atrium doit aussi se prêter à recevoir les ouvertures vers l'extérieur. Cet aspect est de l'ordre de la conception et donc architectural. D'autre part, lorsqu'il est prévu de ventiler naturellement un atrium, il faut faire face aux effets aléatoires de vent. La situation la plus critique se pose en l'absence du vent durant une journée ensoleillée d'été. Dans ce cas, le système de ventilation doit compter uniquement sur le tirage thermique. Les dispositions techniques (dimension et emplacement des ouvrants) doivent se prêter à se substituer aux effets du vent pour assurer le renouvellement d'air.

Dans cette optique une étude est faite dans le but de déterminer la conception fondamentale d'un espace atrium pour une ventilation naturelle, étude concentré sur le degré de perfectionnement d'écoulement réalisé par atrium qui est lui-même 'aéré' directement, par un raccordement à l'extérieur au niveau bas. Un modèle théorique est développé pour prévoir la stabilité de l'écoulement des flux d'air par effet de cheminé, et la stratification thermique dans le bâtiment, due aux gains de chaleur des espace adjacent et aux gains solaires dans l'espace lui-même, et comparé cela aux résultats des expériences de laboratoire.

Des divers régimes de déplacement des flux d'air par effet de cheminé sont décrit, produit dans un seul étage fermé avec une hauteur  $H$  connecté à un espace atrium avec une hauteur  $M$ . un modèle théorique d'un déplacement stable de flux d'aire entre l'étage et

l'espace atrium est développé, qui représente le chauffage dans les deux espaces, l'étage (avec un flux de flottabilité  $B$ ), et l'atrium (avec un flux de flottabilité  $B_{solar}$ ), et qui fournit des prédictions sur le stratification thermique et les débits d'air (Figure III.2, Figure III.3) [Joanne et al. 2003].

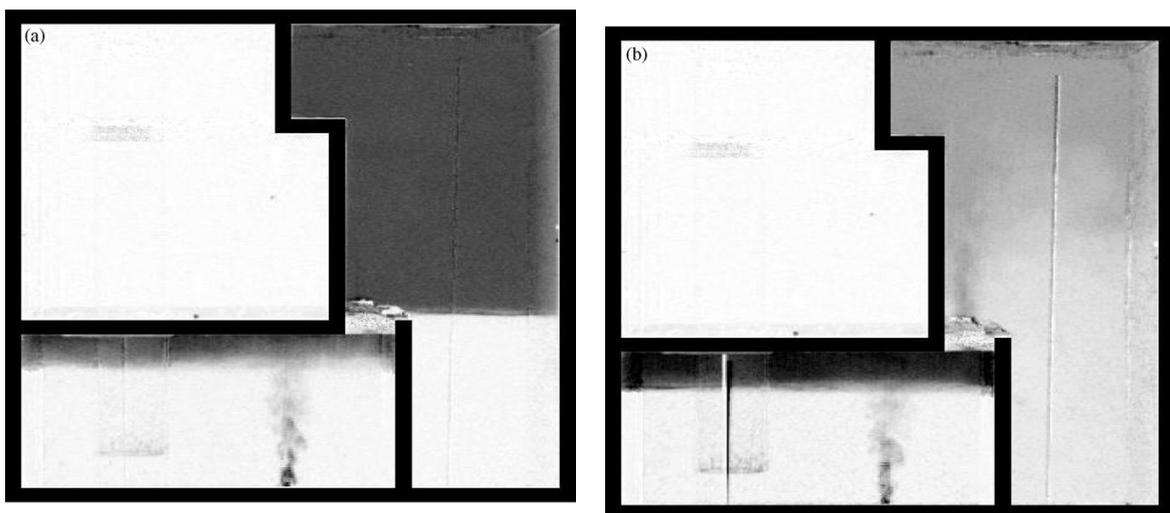


(a) une photographie du modèle acrylique

(b) un schéma de principe illustrant un étage simple, un TDC et un atrium

**Figure III. 2 : Le modèle utilisé dans les expériences**

[Joanne et al. 2003].



(a) Atrium non ventilé

(b) Atrium ventilé

**Figure III. 3 : images montreront le déplacement de flux d'air**

[Joanne et al. 2003].

Les résultats théoriques ont été vérifiés par l'expérience « salt-bath », qui montrent un accord raisonnable. La différence entre la théorie et l'expérience est due à deux facteurs. Premièrement, quand la couche de la flottable de fluide dans l'étage est très mince, l'hypothèse de gradient de la pression hydrostatique dans l'étage décompose en tant que pression dynamique, les variations de la turbulence dans en sortie d'air devient comparable avec le changement de la pression provoqué par la stratification. En conséquence, une certaine flottabilité de fluide s'accumule même lorsque la théorie prévoit une ventilation complète. Deuxièmement, les flottables des fluides déchargés dans l'atrium sont difficiles à modéliser, puisque les murs influencent l'écoulement, et la géométrie des sorties d'air et le coefficient d'entraînement peuvent changer.

Bien que le modèle étudié ici soit beaucoup simplifié, il est une étape utile pour comprendre la conception de la ventilation naturelle dans les bâtiments modernes, tel que les bâtiments à atrium.

### **III.2.2. Modèles empiriques employés en ventilation naturelle :**

Il existe différents modèles empiriques mettant en relation les surfaces des ouvrants, leurs positions, la différence de température et la vitesse du vent en vue de dimensionner un système de ventilation naturelle dans un local. Une série de formules analytiques permettent d'estimer les débits de ventilation induits par la force du vent, par tirage thermique ou bien par la combinaison des deux phénomènes. Ces formulations sont disponibles à la fois pour des locaux ventilés unilatéralement (par une ou plusieurs ouvertures disposées du même côté du local) ou pour des locaux ventilés transversalement [Allard 1998]. Les différentes méthodes empiriques sont d'une aide précieuse lorsqu'il est question d'estimer le potentiel d'un système à ventiler naturellement.

#### **III.2.2.1. Méthode d'Andersen :**

Dans ces travaux portant sur la ventilation naturelle par tirage thermique, Andersen fait remarquer que les modèles existants conduisent à des résultats divergents [Andersen 1995a]. Cela peut conduire inévitablement à des incertitudes pour dimensionner le système de ventilation [Foster et al. 1987]. Ce constat fait, Andersen propose des formulations analytiques dérivées de celles appliquées à la ventilation naturelle d'un local à deux ouvertures.

Ces formulations permettent de dimensionner les ouvrants et d'évaluer les débits de ventilation en se basant sur la différence de température ou de densité de l'air. Il est important de noter, avant de présenter les formulations d'Andersen que celles-ci sont applicables en considérant que la température intérieure est connue. En ce qui concerne les atriums, l'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle peut être employée aussi bien dans un local classique (où les températures sont sensiblement homogènes), que dans un grand volume soumis à la stratification thermique (notons que peu de références sont disponibles à ce sujet). Dans ce cas, un facteur de stratification ( $\epsilon_s$ ) est introduit dans les formulations. Ce facteur est défini par Andersen comme étant le rapport entre la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur à la sortie de l'air chaud (en haut de l'atrium) par rapport à la différence entre la température moyenne de l'atrium et celle de l'extérieur (Figure III.4).

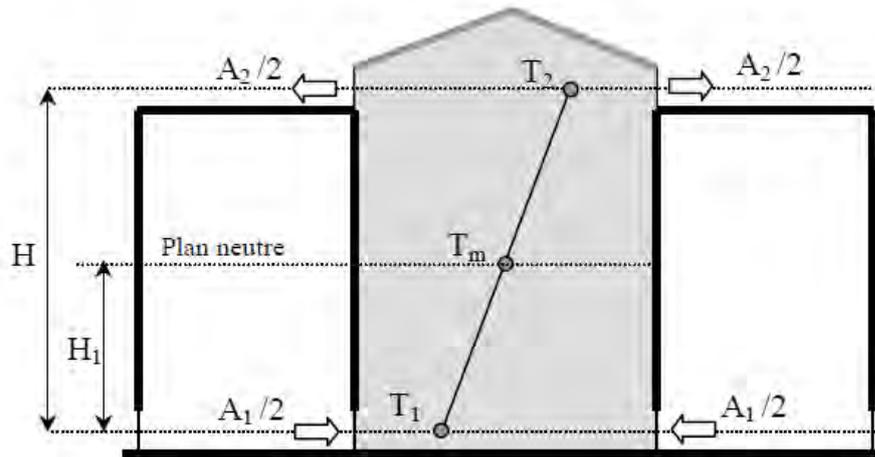


Figure III. 4 : schéma explicatif concernant la prise en compte de la stratification

[Andersen 1995]

➤ Recherche de A1 en fonction de  $\Delta T_m$  à atteindre :

Plusieurs formulations sont proposées par Andersen. Lorsqu'il s'agit de déterminer la surface d'ouverture (surface de l'entrée et de la sortie d'air) à respecter pour atteindre une température d'air intérieure voulue dans l'atrium, cette surface peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$A_1 = 6.2 \cdot 10^{-7} \frac{Q_s}{c_{d1} \cdot \epsilon_s} \cdot \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/2} \cdot \left[ \frac{T_m}{\Delta T_m} \right]^{3/2} \dots\dots\dots(10)$$

$A_1$  : étant la surface de l'entrée d'air ( $m^2$ ).

$Q_s$  : la quantité de chaleur qui a permis à l'air intérieur de s'échauffer (W).

$C_{d1}$  : est le coefficient de perte de charge de l'ouverture  $A_1$ .

$\epsilon_s$  : le facteur de stratification ( $\epsilon_s = \Delta T_2 / \Delta T_m$ ).

$H_1$  : la distance verticale entre le plan neutre et l'ouverture  $A_1$  (le plan neutre est la hauteur à laquelle la pression à l'intérieur est égale à celle de l'extérieur) (m).

$T_m$  : la température moyenne de l'air à l'intérieur ( $^{\circ}C$ ).

$\Delta T_m$  : la différence entre la température moyenne interne et celle de l'extérieur ( $^{\circ}C$ ).

Le débit de ventilation qui correspond à  $A_1$  et  $\Delta T_m$  peut être déterminé par la relation suivante :

$$V = C_{d1} \cdot A_1 \cdot \left[ \frac{2 \Delta T_m g H_1}{T_m} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

Cette formulation permet d'évaluer le volume d'air  $V$  passant à travers  $A_1$  en fonction de  $T_m$ . Il est aussi possible d'obtenir  $V$  en se basant sur  $Q_s$  :

$$V = 0.038 \cdot \left[ \frac{Q_s}{\epsilon_s} \cdot H_1 \right]^{1/3} \cdot (C_{d1} \cdot A_1)^{2/3} \dots\dots\dots (12)$$

Les formulations que nous venons de voir sont exprimées en fonction de la distance  $H_1$  (position du plan neutre par rapport à l'entrée d'air). Celle-ci dépend du ratio entre  $A_1$  et  $A_2$  ( $A_2$  étant la surface de la sortie d'air). En somme, du ratio d'ouverture  $A_1/A_2$  dépendra de la capacité de ventilation de l'atrium. Il est cependant nécessaire de savoir quelle est la valeur du ratio à respecter pour atteindre des débits de ventilation optima afin de bien ventiler l'atrium. Pour ce faire, la formulation précédente peut être écrite en fonction de la distance  $H$  qui sépare les ouvertures 1 et 2 et de  $A$  la surface totale des ouvertures ( $A=A_1+A_2$ ). En considérant  $n \sim A_1/A_2$  cette formulation s'écrit :

$$V = 0.038 \cdot (1/2) \cdot \left[ \frac{1}{1+n} \right]^{2/3} \cdot \left[ \frac{1}{1+n^2} \right]^{1/3} \cdot \left[ \frac{Q_s}{\epsilon_s} \cdot H \right]^{1/3} \cdot (C_{d1} \cdot A_1)^{2/3} \dots\dots\dots(13)$$

Le volume d'air entrant  $V$  atteint sa valeur maximale lorsque  $n = 1$  c'est à dire lorsque les surfaces  $A_1$  et  $A_2$  sont égales :

$$V_{max} = 0.038 \cdot (1/2) \cdot \left[ \frac{Q_s}{\varepsilon_s} \cdot H \right]^{1/3} \cdot (C_{d1} \cdot A_1)^{2/3} \dots\dots\dots (14)$$

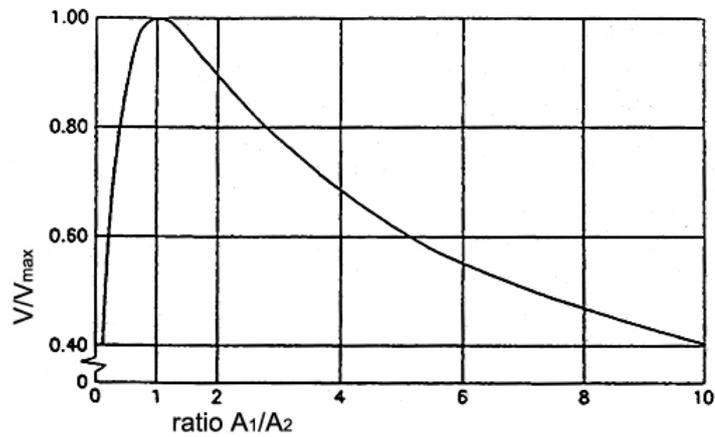


Figure III. 5 : capacité de ventilation en fonction du ratio A1/A2

[Andersen, 1995]

Comme le montre la figure précédente, pour obtenir des valeurs de V proches de V<sub>max</sub> le ratio A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub> doit être compris entre 0,5 et 2.

➤ Recherche de A1 en fonction de V à atteindre :

Par ailleurs, lorsqu'il s'agit de déterminer la surface de l'ouverture A<sub>1</sub> à respecter pour atteindre un volume de renouvellement d'air souhaité, la formulation à employer est la suivante :

$$A_1 = 140 \cdot \frac{V^{2/3}}{\left[ \frac{Q_s}{\varepsilon_s} \cdot H_1 \right]^{1/2} \cdot C_{d1}} \dots\dots\dots(15)$$

Une fois que A<sub>1</sub> est calculée, il est possible de déterminer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur qu'entraîne le volume d'air V par la formulation suivante :

$$\Delta T_m = 7.3 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T_m \cdot \left[ \frac{Q_s}{\varepsilon_s \cdot C_{d1} \cdot A_1} \right]^{2/3} \cdot \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (16)$$

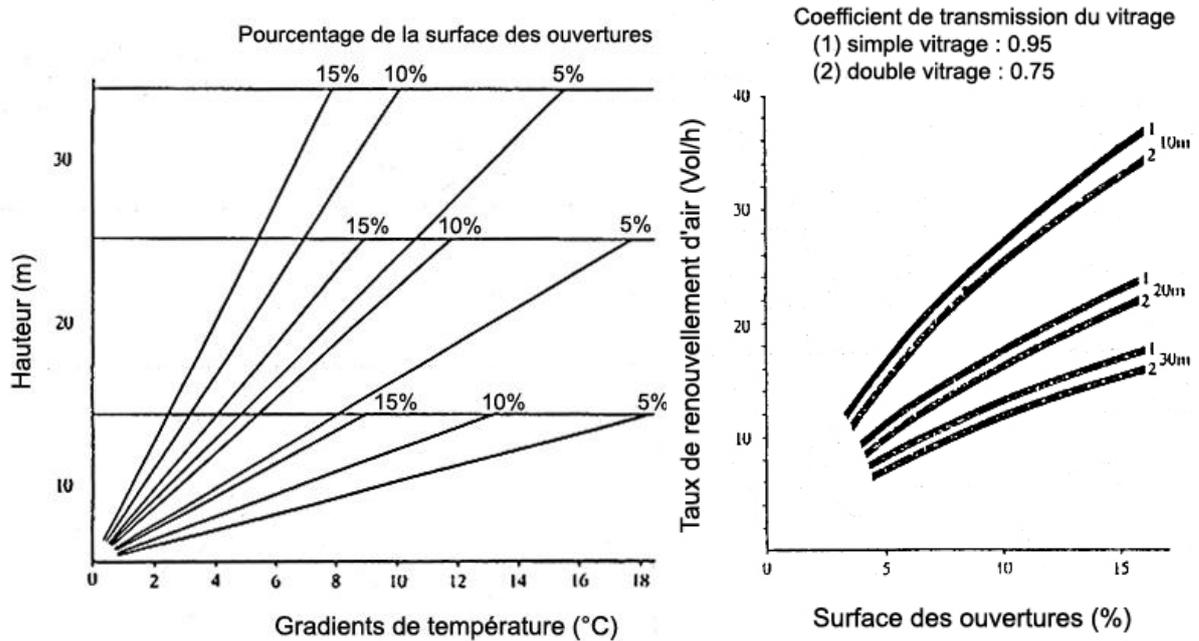
Nous avons présenté ici les formulations analytiques établies par Andersen permettant le pré-dimensionnement du système de ventilation naturelle par tirage thermique dans un volume soumis à la stratification. D'autres formulations permettent d'avoir les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur à proximité des ouvertures ainsi que les vitesses d'air

aux entrées et aux sorties d'air. Nous n'avons pas jugé utile de les présenter ici et les reportons avec l'ensemble des considérations théoriques en annexe.

### III.2.3. Effet de la ventilation naturelle sur la stratification thermique :

Le rafraîchissement par voie naturelle durant une journée extrême d'été dépend en partie, comme nous venons de le voir, de la surface des ouvrants requise pour l'admission de l'air extérieur nécessaire pour évacuer les surchauffes et la pollution à l'intérieur du volume. Dans le cas d'un atrium, la ventilation naturelle a pour rôle d'atténuer la stratification thermique. Cependant, dans quelle mesure les taux de renouvellement d'air sont capables de réduire la stratification thermique? Une étude visant à examiner le potentiel de la ventilation naturelle par tirage thermique à améliorer le confort durant l'été apporte une réponse partielle à cette question [Owens et al. 1987].

En utilisant des simulations comme moyen d'investigation, les auteurs ont entrepris une étude paramétrique en comparant trois configurations d'atriums de hauteurs différentes 10, 20 et 30 m. Parmi les paramètres testés figurent la surface des ouvertures. Les simulations ont été effectuées avec trois surfaces différentes. Celles-ci correspondent à 5, 10 et 15 % de surface du plancher de l'atrium. Les caractéristiques du vitrage de la toiture ont à leur tour fait l'objet de variations en adoptant le simple et le double vitrage pour la couverture. Les résultats obtenus ont permis de comparer les gradients thermiques correspondants aux différentes variantes étudiées (Figure III.6). Il est cependant important de noter que les simulations entreprises prennent en compte les conditions d'un climat tempéré durant une journée d'été. La température d'air maximale et la moyenne journalière sont respectivement de 25 et 20 °C.



**Figure III. 6: à gauche, gradients thermiques verticaux pour les trois atriums en fonction du pourcentage d'ouverture. A droite, taux de renouvellement d'air pour deux vitrages différents**

[Owens, 1987]

L'analyse des résultats obtenus fait d'une part ressortir que les taux de renouvellement d'air sont un peu plus importants dans le cas où le coefficient de transmission du vitrage est le plus élevé (0,95). Cela paraît évident lorsque l'on sait que les gains solaires dans ce cas accentuent le tirage thermique et par conséquent le potentiel de ventilation. Celui-ci atteint à peu près 35 Vol/h pour un atrium dont la hauteur est de 10 m contre à peine 16,8 Vol/h pour un atrium de 30 m de hauteur. D'autre part, en comparant les gradients, nous pouvons nettement apercevoir l'effet de l'augmentation de la surface des ouvrants sur le gradient thermique vertical. En triplant cette surface, celui-ci est atténué d'environ 10 °C dans le cas d'un atrium fortement stratifié.

Même si l'effet bénéfique de l'augmentation des débits sur la stratification paraît évident, cette étude n'apporte pas de détails sur la manière qui a été adoptée pour conduire les simulations. Les gradients nous semblent en effet assez exagérés.

III.2.4. Impact de la ventilation nocturne :

L'impact de la ventilation sur la température interne a été étudié dans la recherche faite par [Arvind Devikar 2001] selon la façon suivante :

- Ventilation continue tout au long de la journée (24 heures)
- Ventilation nocturne de 1 à 9 heures et de 19 heures à 24 heures (Fenêtres fermées pendant 10h à 18 heures).

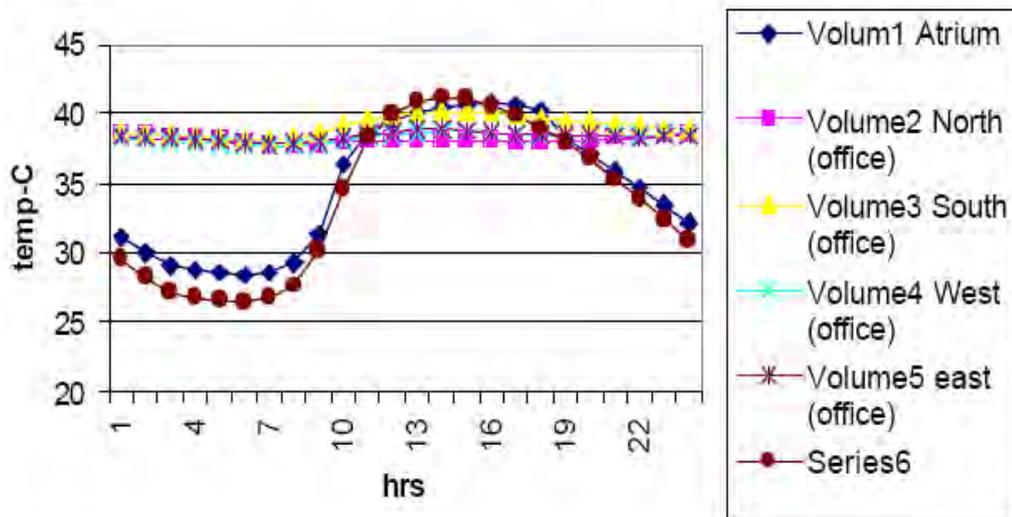


Figure III. 7 : Résultats de la ventilation nocturne (Mai)

[Arvind Devikar 2001]

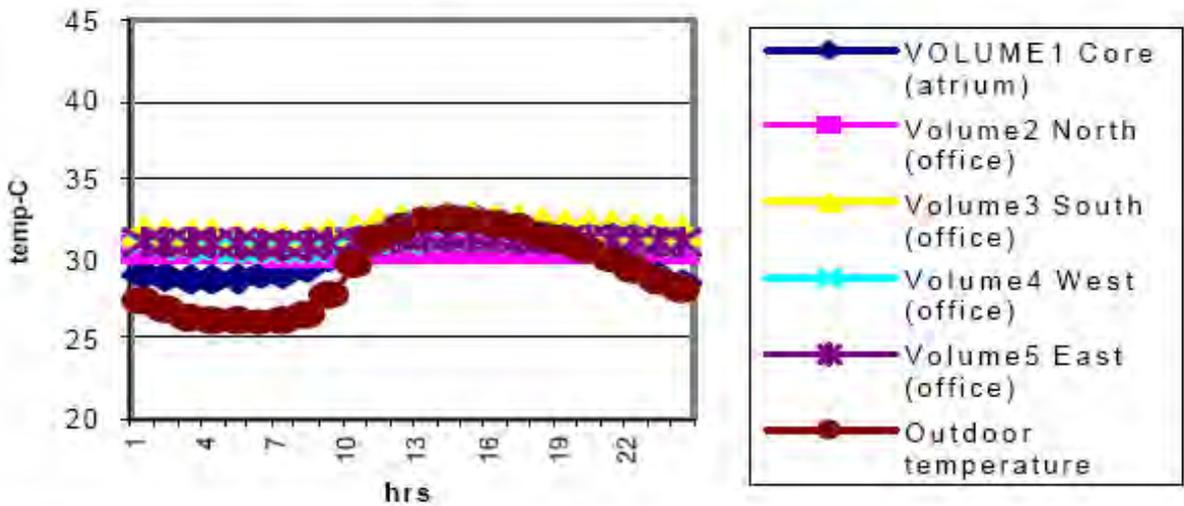


Figure III. 8 : Résultats de la ventilation nocturne (Août)

[Arvind Devikar 2001]

Les résultats de la simulation de cas de base pour l'évaluation de l'impact de la ventilation nocturne sur la température du volume (Figure III.8 / 9) pour les mois de Mai et Août(Humide) montre que :

- ✓ Pour le mois de Mai :
  - La température de jour pendant des heures 10-18 est moins que la température extérieure. C'est une amélioration de la température de jour de cas de base.
  - La température d'autres volumes demeurent dans la gamme de 37°C à 38.5°C tout au long de la journée qui est moins que la température de ces volumes dans le cas de base. C'est également une amélioration.
- ✓ Pour le mois d'Août :
  - Il y a une amélioration remarquable de la température de l'atrium pendant les heures de travail.
  - La température des autres volumes est également descendue et elle est constante tout au long de la journée.

### **III.3. Les outils de simulation appliqués aux ambiances thermo-aérauliques dans les atriums :**

La modélisation du comportement thermique dans les atriums ou plus généralement dans les espaces de grandes dimensions est différente de celle appliquée aux espaces de taille plus restreinte tel qu'un bureau par exemple. En effet les atriums de par leur grand volume et l'importance de la surface du vitrage zénithal permettent des apports en flux solaires (CLO) importants. Cela provoque une hétérogénéité des températures qui se traduit par la stratification des températures d'air [Groleau et al. 1994] ainsi qu'une distribution hétérogène des vitesses d'air non négligeable. Ces phénomènes que l'on ne rencontre pas dans les espaces de taille classique sont donc propres aux grands volumes vitrés.

Différentes approches sont possibles pour la modélisation du comportement thermique d'un atrium, elles dépendent du degré de précision attendu. Nous présentons dans ce qui suit les outils de simulations généralement utilisés dans l'étude du comportement thermo-aéraulique des atriums. Nous décrirons à l'aide d'exemples concrets la nature de chaque outil et comment il est exploité. Notre objectif ne consiste pas à dresser un état de l'art

exhaustif sur la panoplie d'outils existants dédiés à la simulation thermique dans le bâtiment mais de préciser les tendances de modélisation les plus répandues.

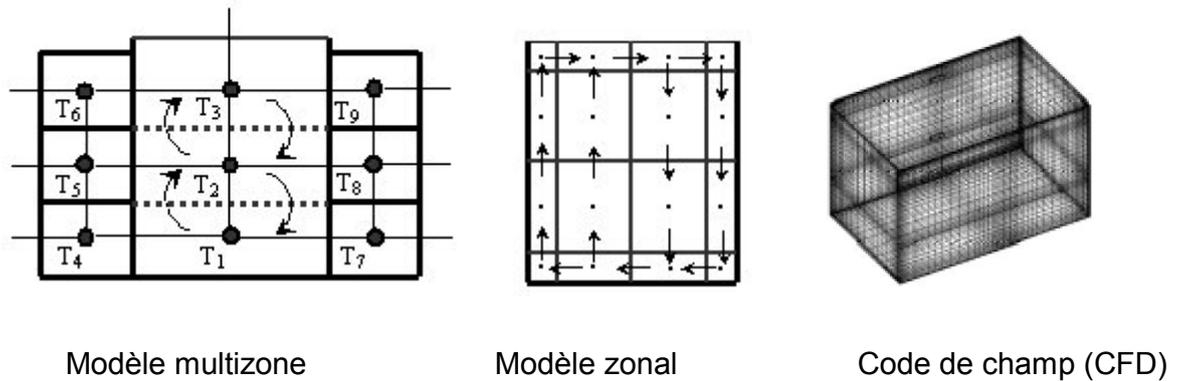


Figure III. 9 : les différentes discrétisations spatiales utilisées pour le cas les atriums

[Groleau et al. 1994]

III.3.1. Les méthodes simplifiées :

Avant d'aborder les outils de simulation, il est important de noter que certaines méthodes simplifiées existent et permettant de prédire le comportement moyen d'un atrium en se basant sur des données météorologiques et des conditions d'ensoleillement. Ces lois n'ont d'intérêt que pour approcher grossièrement le comportement thermique de l'atrium. Donnons pour exemple la méthode simplifiée établie par Wall pour évaluer la température moyenne du volume [Wall 1995, 1996]. Celle-ci exprime la température interne en fonction de la température extérieure, celle des espaces adjacents et d'un paramètre G qui représente le rapport entre les pertes de chaleur de l'atrium vers l'extérieur (conduction et renouvellement d'air) et les gains de chaleur (chauffage des espaces adjacents et flux solaires). La relation s'écrit :

$$T_a = T_{ext} \cdot \frac{1}{1+G} \cdot (T_{adj} - T_{ext}) \dots \dots \dots (17)$$

Avec :

$T_a$  : Température de l'air dans l'atrium

$T_{ext}$  : Température extérieure

$T_{adj}$  : Température dans les espaces adjacents

A partir d'un nombre limité de paramètres dont le concepteur dispose au tout début du projet, ces méthodes de calcul manuelles permettent d'avoir rapidement des ordres de grandeur sur la température d'air centrale par exemple. Toutefois, il est nécessaire par la suite de procéder à d'autres calculs plus élaborés afin d'arriver à des résultats plus probants.

### III.3.2. Les modèles multizones :

Ces modèles sont désignés par le terme « multizones » car ils permettent d'appréhender le comportement simultané de plusieurs zones d'un même bâtiment ; chaque zone représente une pièce (un local). On peut distinguer les modèles multizones énergétiques et aérauliques. Le premier type est destiné aux calculs des performances énergétiques des bâtiments. Parmi les codes de calcul commercialisés souvent utilisés nous pouvons citer les codes tels que TRNSYS (type 56), DOE-2, ENERGYPLUS et BLAST. Les modèles aérauliques sont quant à eux nécessaires pour prendre en compte les effets de la ventilation (vent, ventilation naturelle). Ils permettent de traiter les problèmes d'infiltrations d'air et des débits interzonaux en se basant principalement sur une seule variable qui est la pression. Les débits d'air entrants et sortants entre les pièces sont calculés à partir de données telles que la perméabilité des parois à l'air, le système de ventilation utilisé, la géométrie des ouvertures et la température d'air. Les codes les plus connus utilisés dans ce domaine sont AIRNET, CONTAM93 ou encore COMIS.

Les deux familles de modèles que nous venons de présenter traitent séparément les problèmes liés à l'énergétique et les échanges d'air dans un bâtiment. Dans la réalité, les consommations énergétiques dépendent en grande partie des débits d'air échangés par infiltrations et flux interzonaux. Ces débits sont à leur tour conditionnés par les températures d'air. Pour cette raison il est nécessaire de traiter simultanément ces deux aspects par le biais d'un couplage thermo-aéraulique. Ceci est réalisable en unifiant deux codes comme cela a été le cas entre TRNSYS et COMIS [Dorer et al. 1999 ; IEA, 1996]. D'autres codes sont capables d'effectuer des simulations mixtes thermo-aérauliques. C'est par exemple le cas de ESP-r ou de BREEZE qui en général se basent sur la résolution du système énergétique et aéraulique séparément tout en assurant un couplage physique par des stratégies d'itérations du type « ping-pong » ou « oignons ». Une autre approche plus récente consiste à résoudre directement toutes les équations du système thermo-aéraulique. C'est le cas de CLIM 2000 ou SPARK.

Après avoir présenté les différents modèles multizones nous nous intéresserons à leur application dans le cas des atriums. La simulation thermo-aéraulique, en employant un modèle multizone, permet de prendre en compte les variations des températures d'air qui existent entre les différentes pièces en les considérant comme thermiquement homogènes. Dans le cas des grands volumes tels que les atriums la température d'air au centre du volume ne peut pas être considérée comme représentative de l'ambiance thermique, car elle ne traduit par l'effet de la stratification des températures d'air. Cependant, même si le recours à des modèles multizones semble ne pas être adapté aux grands volumes, certaines publications montrent que ces modèles peuvent être utilisés pour évaluer la variation verticale des températures dans un atrium. Pour cela il est nécessaire de faire intervenir une hypothèse simplificatrice de modélisation qui consiste à découper le volume en plusieurs zones. Ainsi, il est possible d'évaluer les températures d'air dans les différentes zones pour prendre en compte le phénomène de stratification.

Parmi ces travaux, une étude visant à comparer les résultats de mesures dans un atrium existant aux résultats de simulations a été menée en utilisant le code ESP-r [Laouadi et al. 1999]. Afin d'étudier le comportement thermique de l'atrium de façon à évaluer la stratification des températures d'air, le volume a été divisé en quatre zones superposées. Ce découpage obéit à la configuration de l'espace dont la hauteur comprend trois niveaux plus le volume qui se trouve sous la verrière. Les différentes zones sont séparées par des parois fictives qui permettent une transmission totale des flux solaires(CLO) à travers les différentes zones. L'émissivité et la conductance des parois quant à elles sont considérées comme négligeables. Les échanges d'air entre les zones sont définis à partir de mesures par gaz traceur.

Comparés aux mesures, les résultats des simulations montrent que les flux solaires nets absorbés par les parois de l'atrium semblent en adéquation avec les résultats expérimentaux, excepté durant les jours d'été nuageux pendant lesquels les flux sont sous-estimés de 20 %. Durant la même saison les profils des températures mesurées et simulées semblent suivre les mêmes tendances. Lorsque l'espace est soumis à une forte stratification, le modèle surestime les températures d'air de l'atrium de 2 à 3 °C.

Cette étude montre clairement que le modèle utilisé dans un espace tel qu'un atrium évalue correctement les flux solaires absorbés par les parois. L'utilisation d'un découpage en plusieurs zones montre qu'il est possible de rendre compte de la variation verticale des températures. Les limites apparaissent pour évaluer les températures d'air. Un écart

considérable subsiste tout de même entre les températures d'air évaluées et celles mesurées lorsque l'atrium est fortement stratifié. L'explication qui peut être mise en avant réside dans le fait que le code en question présente des limites en matière de traitement des échanges radiatifs (GLO) dans le cas du découpage d'un volume en plusieurs zones [Voeltzel 1999]. En effet, les bilans radiatifs dans le logiciel ESP-r sont écrits pour chaque zone séparément. De ce fait, les transferts radiatifs entre les différentes zones de l'atrium séparées par des parois fictives (implicitement opaques au rayonnement GLO) ne sont pas pris en compte.

Une autre étude du même genre a été menée [André 1994a, 1994b ] en utilisant le code multizone TRNSYS type 56. L'objectif consistait à étudier le comportement thermique d'un bâtiment comportant un atrium. Le même principe de découpage décrit plus haut est utilisé pour mener les simulations. Contrairement à l'étude précédente, qui concernait un atrium existant, il s'agit ici d'un atrium qui n'est pas encore construit. De ce fait il n'existe aucune donnée permettant de connaître les échanges d'air réels entre les zones. L'auteur propose donc de calculer ces échanges interzones à l'aide d'un modèle basé sur les équations de Bernoulli qui est implémenté sous forme d'un nouveau type couplé au type 56 de TRNSYS. En utilisant cette méthode il souligne que le recours à cette démarche a permis d'obtenir des résultats encourageants puisqu'ils traduisent assez bien l'effet de stratification.

Les deux études que nous venons de présenter montrent que les codes multizones, bien qu'ils soient dédiés à la modélisation des espaces classiques, peuvent être utilisés pour un atrium. Ces codes ont l'avantage d'appréhender le comportement thermique en régime variable dans un délai acceptable. Toutefois, les simplifications introduites dans la modélisation peuvent affecter la précision des calculs surtout quand il s'agit d'une hétérogénéité importante des températures d'air.

### **III.3.3. Les modèles zonaux :**

Les modèles zonaux permettent de simuler le champ thermo-convectif à l'intérieur d'un bâtiment [Inard 1996a, 1996b]. Ils peuvent être considérés comme intermédiaires entre les modèles multizones et les codes de champs (CFD). Selon leur degré de complexité, il existe différents modèles zonaux qui ont été utilisés dans le cas des atriums. Nous nous intéresserons ici particulièrement à la modélisation aéraulique bi et tridimensionnelle.

### III.3.3.1. Modèles zonaux bidimensionnels :

Ces modèles ont été développés pour prendre en compte la stratification et les mouvements d'air dans les grands espaces [Togari et al. 1993, Arai et al. 1994]. Le volume d'air est subdivisé en plusieurs zones superposées sur toute la longueur de l'espace avec un découpage plus fin près des parois. Les moteurs d'écoulement sont considérés comme étant les flux d'air le long des parois verticales ainsi que les jets de soufflage d'air. La distribution horizontale des températures d'air de chaque zone est considérée comme uniforme en dehors des zones situées près des parois et des zones de soufflage. Les échanges de chaleur entre les zones sont modélisés en faisant intervenir un coefficient d'échange.

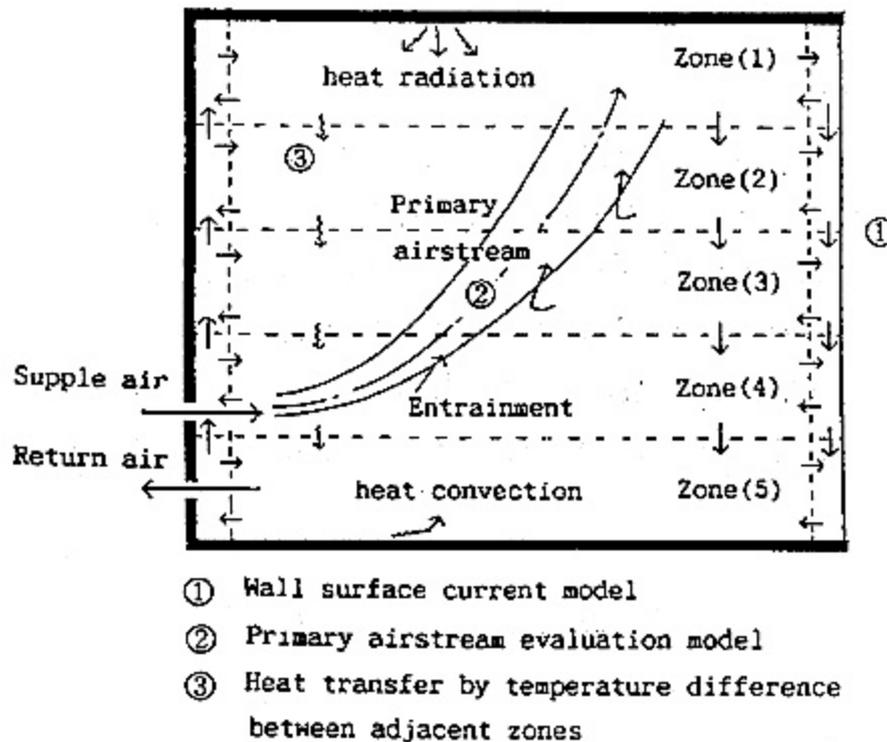


Figure III. 10: modélisation d'un grand volume avec un modèle zonal bidimensionnel (Togari et al., 1993)

En adoptant les mêmes principes de subdivision du volume, un modèle bidimensionnel a été développé par Heller pour modéliser la stratification dans un atrium [Heller 1995]. Par contre, ce modèle n'intègre pas de coefficient d'échange inter-zones comme celui de Togari. Les échanges sont évalués en écrivant un bilan de chaleur qui tient compte à la fois

des températures des différentes zones, des parois composantes l'enveloppe de l'atrium ainsi que la température de l'air entrant. Les températures de surface des parois sont calculées grâce à un couplage effectué entre le modèle zonal et un modèle d'enveloppe. Pour valider le modèle, des simulations et des mesures ont été entreprises dans un atrium existant. Les résultats obtenus sont très satisfaisants puisque l'écart entre les températures expérimentales et les températures est faible (0,5 °C).

En tenant compte de ses résultats, il apparaît que ces modèles semblent bien prendre en compte les hétérogénéités verticales des températures parce qu'ils sont bidimensionnels. Leur principale limitation c'est qu'ils ne permettent pas de prédire les variations horizontales des températures.

### III.3.3.2. Modèles zonaux tridimensionnels :

A la différence des modèles bidimensionnels où le volume est découpé en couches horizontales (2D), le principe des modèles tridimensionnels consiste à diviser le volume d'un local en plusieurs sous volumes parallélépipédiques qui sont considérés comme isothermes. Un bilan massique et thermique est écrit pour chacun des sous volumes. Ces derniers étant connectés entre eux par des bilans massiques. L'utilisation de ces modèles nécessite une bonne connaissance des écoulements moteurs dans le local afin que la discrétisation du volume soit adaptée à la nature des écoulements (zones motrices et zones à faible quantité de mouvement). Les modèles zonaux sont utilisés dans des locaux de grandes dimensions et permettent de prédire correctement la stratification. De plus, ils permettent de mener des simulations en régime variable, ce qui constitue une avancée importante concernant la prédiction du comportement thermo-aéraulique des grands volumes.

### III.3.4. Les codes CFD (Computational Fluid Dynamics) :

Les codes CFD, désignés aussi communément par « codes de champs » sont des outils qui permettent de simuler dans le détail les champs des températures et des mouvements d'air d'un local. A l'origine, ces codes ont été développés pour des applications autres que le bâtiment et ce n'est que depuis quelques années qu'ils sont utilisés pour appréhender les problèmes liés à la ventilation des locaux. D'ailleurs, plusieurs codes sont utilisés actuellement dans ce domaine. Parmi les codes commercialisés actuellement citons l'exemple de FLUENT, STAR-CD, FLOVENT, N3S, ESTET, etc.

Généralement, les codes CFD reposent sur la résolution en éléments ou en volumes finis des équations de Navier-Stokes (conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement) avec des modèles de turbulence adaptés au problème traité ( $K-\varepsilon$ , bas Reynolds, RnG). Pour avoir une description plus exhaustive sur ce type d'outils, on pourra se reporter à [Awbi 1989, 1991], [Jones et al. 1992] ou bien à [Murakami et al. 1987, 1989, 1991]. En comparaison avec les modèles zonaux, les codes CFD nécessitent une discrétisation fine du domaine à simuler. De ce fait les simulations nécessitent des temps de calcul assez élevés. C'est ce qui explique qu'au début de leur utilisation les chercheurs se contentaient d'effectuer des calculs en 2D sur des géométries simples. Avec l'évolution des puissances de calcul, ils sont actuellement employés pour mener des simulations en 3D et sont notamment appliqués aux grands volumes [IEA 1996, Murakami 1992].

A ce sujet, nombreux sont les atriums simulés à l'aide d'un code CFD [Ozeki et al. 1992, 1996, Groleau et al. 1994, Svidt et al. 1996, Kato et al. 1995]. Ce genre d'études vise soit à analyser le comportement thermo-aéraulique d'un atrium (afin de détecter d'éventuels problèmes de confort), soit à tester l'efficacité d'une stratégie de ventilation ou bien encore à évaluer la dispersion des polluants qui peut être nuisible aux usagers. Cependant, si le recours à un tel outil permet d'analyser la distribution des températures et des vitesses d'air avec un grand degré de résolution, les conditions aux limites thermiques et aérauliques, en revanche, sont souvent difficiles à établir. Ces conditions qui servent comme données d'entrée aux calculs sont d'autant plus difficiles à déterminer lorsqu'il s'agit de grands volumes tels que les atriums ; les parois étant largement sollicitées par les flux solaires, il est donc nécessaire de retranscrire les conditions thermiques sur les parois qui constituent l'enveloppe de l'atrium. Plusieurs méthodes permettent de déterminer ces conditions. La solution la plus simple consiste à mesurer les températures de surface internes des parois. Les températures mesurées sont alors directement imposées (à l'aide d'une loi de paroi) comme conditions thermiques aux parois. En dehors de cette méthode, qui suppose que l'atrium soit déjà construit (lorsqu'il s'agit de mener une étude à posteriori), cinq méthodes ont été analysées par Schild en fonction du raffinement du maillage à proximité des parois. Parmi ces méthodes, ce dernier recommande l'utilisation de deux d'entre elles [Schild et al. 1995, 1997]. La première consiste à coupler le code CFD avec un modèle d'enveloppe qui prend en charge les transferts radiatifs, ce qui permet de calculer les températures de surface des parois. Cela est réalisable grâce à un processus itératif entre le code CFD et le modèle d'enveloppe afin d'obtenir des températures de surfaces stables. Cette méthode a été utilisée dans différents travaux portant sur les atriums [Ozeki et al. 1994, Kando et al.

1992, Murakami et al. 1994]. La seconde méthode quant à elle, consiste à résoudre les échanges de chaleurs directement dans le domaine de calcul du code CFD à partir des cellules (mailles) se trouvant à proximité des parois. Dans ce cas, l'évaluation des conditions aux limites en températures de surface nécessite la connaissance des températures d'air du côté extérieur de la paroi, sa conductance ainsi que la température d'air du côté intérieur.

A travers ce bref aperçu concernant les codes de champs il semble évident que l'utilisation de ce genre d'outils nécessite une expérience préalable permettant de manipuler les paramètres d'entrée aux calculs. Il faut aussi faire preuve d'une capacité à analyser la cohérence des résultats de façon à ce que ces derniers soient en concordance avec les écoulements qui se produisent en réalité. En plus de ces exigences, il est nécessaire de noter que l'étude du comportement thermo-aéraulique dans un atrium est généralement effectuée en régime permanent. L'étude du comportement en régime variable n'est pas envisageable étant donné les temps de calculs prohibitifs. Enfin, il est important de signaler que le recours à un code de champ n'est possible que lorsque le projet est en phase finale et que la forme de l'atrium est figée. A ce stade de la conception, il est question de vérifier la faisabilité de la stratégie de ventilation choisie.

### III.3.5. Récapitulatif :

Sans nous être trop étendu, nous venons d'exposer un état de l'art des différents outils qui peuvent être utilisés pour simuler le comportement thermo-aéraulique dans un atrium. Chaque catégorie d'outils nécessite un degré de discrétisation spatiale qui conditionne la précision des résultats. Ainsi, les modèles multizones, peuvent être adaptés aux grands volumes en introduisant certaines hypothèses de modélisation. Cela permet une description sommaire de la stratification mais peut s'avérer bénéfique dans les phases amont de conception d'autant plus que les simulations peuvent être effectuées en régime dynamique. En augmentant l'échelle de discrétisation nous retrouvons les modèles zonaux. Pouvant eux aussi être employés en régime dynamique, ces derniers permettent d'obtenir des résultats bien plus précis que les modèles multizones. En plus du champ thermique, ils sont capables de décrire le champ des vitesses d'air dans le volume. Le recours à un modèle zonal semble adapté à la modélisation de la stratification et des mouvements d'air comme le montre les études menées par IEA. En revanche, ces outils supposent que les moteurs d'écoulement soient connus, d'où la difficulté de leur utilisation. Enfin, les codes de champs sont les plus précis dans la hiérarchie de discrétisation de l'espace car ils permettent une

analyse fine du champ thermo-aéraulique. L'utilisation d'un outil sophistiqué tel qu'un code CFD est surtout requise pour analyser dans le détail une stratégie de ventilation ou pour statuer sur un problème délicat d'expertise. De ce fait, leur usage n'est pas envisageable dans les premières étapes de conception du projet. Par ailleurs, la saisie des données et l'exploitation des résultats est assez lourde, ce qui constitue l'inconvénient essentiel de ces outils. En plus, ils exigent des temps de calculs importants et par conséquent ils se prêtent mal à une étude en régime variable.

#### **III.4. Les études menées dans le domaine des ambiances thermo-aérauliques des atriums :**

Lors de la présentation des spécificités relatives aux comportements thermo-aérauliques des atriums nous avons essayé, chaque fois que cela était possible, de nous appuyer sur certains des travaux effectués dans ce domaine pour étayer nos propos. Nous n'avons évidemment pas évoqué l'ensemble des travaux existants puisque les études concernant les ambiances thermiques ou thermo-aérauliques dans les atriums sont nombreuses et leurs centres d'intérêt variés. De ce fait, il est intéressant de répertorier le panorama des études que nous avons pu recueillir lors de notre recherche bibliographique selon leurs objectifs. Nous classons ces études en quatre groupes :

- Des études générales visant à capitaliser toutes les informations et les conseils qui concernent le comportement des atriums.
- Des études qui consistent à valider l'application d'outils dédiés à la simulation du comportement thermo-aéraulique.
- Des études menées dans des atriums existants ou à construire afin de tester les potentialités des stratégies de ventilation à adopter afin d'arbitrer entre les différents choix en vue d'optimiser les conditions de confort.
- Des études paramétriques ayant pour objectif d'analyser l'influence de certains paramètres constructifs sur le comportement.

Nous classifions ici les différents travaux par rapport à ces groupes en tentant de présenter des exemples d'études.

### III.4.1. Etudes générales menées dans le cadre des atriums :

Nous qualifions ces études de générales non pas par rapport à l'intérêt qu'elles suscitent, mais parce que d'une part elles constituent des analyses synthétiques faites à partir de plusieurs études de cas et, d'autre part, elles abordent divers aspects. Dans cette catégorie, nous pouvons évoquer deux études déjà citées auparavant. Il s'agit du rapport ASTER (Atrium Studies Technical Review) [Lomas et al. 1994] et de l'étude de Yoshino menée au Japon [Yoshino et al. 1995].

La première étude représente une compilation d'informations, de recommandations et de messages recueillis à travers l'analyse d'une vingtaine de bâtiments parmi les deux mille construits comportant un atrium lors de ces dernières années au Royaume Uni. Ces messages, basés sur l'expérience des concepteurs et des experts, sont aussi bien d'ordre architectural à travers l'étude des fonctions de l'espace, des éléments constructifs, des dispositifs permettant la protection solaire, que d'ordre technique par l'étude des températures intérieures, des stratégies de ventilation employées, des consommations énergétiques, de l'éclairage naturel ou artificiel, de l'acoustique ainsi que les mesures anti-incendie. L'analyse étant faite, les auteurs tentent de juger de la pertinence de chaque message en effectuant un recoupement entre les informations émises d'un bâtiment à l'autre. En guise de recommandations destinées aux concepteurs pour mieux les orienter dans leurs projets, les auteurs dressent une analyse de ces informations selon leurs degrés de pertinence, leurs domaines d'application, et leurs influences sur les conditions de confort des occupants.

La deuxième étude se veut un peu moins exhaustive que la première puisqu'elle aborde, en dehors des aspects d'ordre général de la conception (la fonction, la typologie, configuration), uniquement les stratégies de ventilation et le comportement thermique. Par ailleurs, dans cette étude quantitative l'auteur se focalise surtout sur ces deux derniers points et tente, en s'appuyant sur une analyse comparative des résultats, de quatorze bâtiments à atrium parmi les deux cents construits au Japon. Cette comparaison permet de dresser différentes tendances de comportement thermique rencontrées ainsi que les différentes stratégies habituellement adoptées pour le contrôle des ambiances thermo-aérauliques. Contrairement à l'étude précédente où les auteurs cherchent à dégager des recommandations, les éléments de conclusion émis par l'auteur se présentent sous la forme d'une synthèse des travaux analysés. Celle-ci permet de mettre en avant les risques éventuels de surchauffes et les mesures habituellement mises en œuvre pour les éviter.

### III.4.2. Etudes dédiées aux techniques et aux outils de simulation :

Face aux différents problèmes de modélisation rencontrés dans le domaine de la thermique et des flux d'air dans les atriums, plusieurs études ont été consacrées pour tester divers modèles de simulation en vue de leurs applications pour prédire le comportement thermo-convectif d'un grand volume. Parmi ces études, nous pouvons citer les travaux de IEA dans le cadre de l'annexe 26 concernant la ventilation des grands volumes dans le bâtiment [IEA 1996]. Cette étude met en évidence les problèmes liés aux mouvements d'air, à la stratification et à la concentration des polluants qui sont généralement présents dans les grands volumes. Ces travaux sont aussi axés sur l'analyse et la comparaison des différents outils de simulation et de leurs degrés de fiabilité pour prédire ces phénomènes. Les outils en questions concernent les modèles de simulations et les différentes techniques de mesure et de diagnostic.

Les auteurs différencient entre une première catégorie d'outils dit « macroscopiques » qui rassemblent les modèles simplifiés destinés à une évaluation préliminaire du comportement. C'est l'exemple des modèles multizones ou des modèles zonaux présentés auparavant. Le second groupe d'outils dit « microscopiques » comprend des modèles tels que les codes de champs qualifiés comme plus précis que les premiers modèles.

Après avoir décrit les différents modèles et techniques de mesure existants, les auteurs entreprennent l'évaluation d'une série d'outils à travers leurs applications sur des cas d'étude. Parmi les bâtiments pris comme support d'application nous pouvons citer l'exemple de l'atrium de Yokohama au Japon. Un programme de mesure de deux ans a été mis en place dans cet atrium expérimental (à échelle réelle) dans lequel des mesures détaillées de plusieurs paramètres (températures d'air, de surfaces et de vitesses) ont été de simulation de plusieurs équipes de recherche participantes à ce programme. Divers outils de simulation ont été utilisés tels que les codes CFD et les modèles zonaux pour appréhender la distribution des températures et les flux d'air dans l'atrium expérimental en se basant sur des conditions aux limites mesurées. Les objectifs de la simulation consistaient à savoir :

- comment simplifier les conditions aux limites en utilisant un code CFD,
- dans quelle mesure la discrétisation (le maillage) peut affecter les résultats des simulations,

- dans quelle mesure les coefficients de transferts convectifs près des parois ont une influence sur les calculs,
- quelles sont les performances des modèles zonaux et des codes CFD dans la prédiction de la distribution verticale des températures.

En ce qui concerne les conditions aux limites à appliquer aux codes CFD, les auteurs mettent l'accent sur la nécessité d'utiliser des conditions réalistes. C'est le cas des conditions aux limites thermiques. La prise en charge des températures de surfaces des parois de l'atrium expérimental dans les calculs et la négligence de ceux de la structure métallique supportant le vitrage par exemple peut conduire à des résultats erronés. Cependant, les auteurs signalent qu'une légère variation des conditions aux limites n'affecte pas énormément la distribution des températures et des flux d'air.

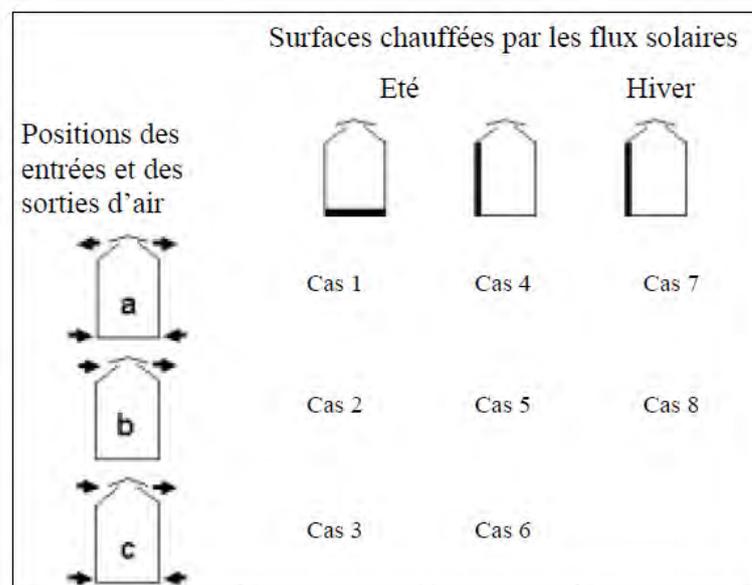
Pour ce qui est des maillages appliqués aux codes CFD et des transferts convectifs, les auteurs estiment que ces derniers sont d'autant plus précis que le maillage à proximité des parois est fin. Aucune indication quant à la taille des mailles à respecter n'est précisée. Ils indiquent aussi que le recours à un modèle de turbulence  $k-\epsilon$  bas-Raynolds permet une meilleure estimation des transferts convectifs mais demande des temps de calculs élevés et se prête mal à l'utilisation. A ce sujet, les auteurs recommandent plutôt d'utiliser un modèle  $k-\epsilon$  associé à une loi de paroi et un raffinement approprié du maillage [IEA 1996]. Par ailleurs, pour les modèles zonaux, des corrélations ont permis d'estimer les coefficients de transferts convectifs ( $3 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour le plancher et le plafond et  $1,5 \Delta T^{1/3}$  pour les murs verticaux), ce qui semble donner de bons résultats.

Enfin, en se basant sur la comparaison des résultats des mesures et des simulations, les conclusions relatives à l'emploi des outils qui ressortent des travaux de l'IEA montrent que si un code CFD est utilisé avec précaution, il conduit à des prédictions fiables. Les modèles zonaux peuvent eux aussi donner des résultats satisfaisants puisqu'ils décrivent convenablement la distribution verticale des températures dans les grands volumes.

#### **III.4.3. Etudes menées dans des atriums existants ou à construire :**

Dans le champ des études du comportement des atriums, on rencontre souvent des études d'expertise quand il s'agit d'évaluer le système de ventilation à posteriori (dans le cas d'un bâtiment construit) ; cela peut se faire grâce à la mesure ou la simulation. Il arrive aussi, comme c'est fréquemment le cas, de tester les potentialités du système de

ventilation à adopter pour un atrium à construire. Implicitement, cela revient à étudier le comportement de l'atrium en se servant de la simulation numérique. Dans ce cas l'étude peut être vue sous l'angle d'une assistance à la maîtrise d'œuvre. Ce genre d'étude vise à améliorer le projet en proposant un système de régulation qui garantit une bonne ventilation du volume à travers des dispositions spécifiques. La modification de l'emplacement des ouvrants et leurs tailles en est un exemple. Les résultats obtenus permettent d'arbitrer entre telle ou telle solution et permettent de les exprimer en termes de principes correctifs. Parmi les multitudes d'études qui rentrent dans cette catégorie, nous présentons un exemple typique où il est question de transformer un ancien édifice en y ajoutant un atrium et où les auteurs tentent d'analyser la performance de plusieurs stratégies de ventilation pour lesquels ils ont opté comme le montre la figure suivante :



**Figure III. 11 : les différentes stratégies analysées en fonction des positions des ouvertures et de la localisation de la tache solaire**

[Svidt, 1996].

Ayant conscience que des surchauffes sont à craindre durant l'été, les auteurs ont eu recours à la simulation à l'aide d'un code CFD pour tester l'efficacité de certaines options de conception en vue de la ventilation naturelle de l'atrium. Les options proposées sont relatives à l'emplacement des ouvrants qui permettent le renouvellement d'air. La première option (*a*) testée consiste à ouvrir simultanément les ouvrants haut et bas de même taille dans le cas où la ventilation naturelle se ferait par effet de tirage thermique (absence du vent). La deuxième option (*b*) représente la configuration où les ouvrants sont placés

uniquement en partie haute. Concernant la dernière option (c), il est supposé que la taille des ouvrants de la partie haute est plus importante que celle des ouvrants en partie basse. Dans les deux derniers cas (b et c), les auteurs supposent que la force du vent permet la ventilation. Pour analyser les potentialités de chaque option dans des conditions d'ensoleillement différentes, les trois stratégies ont été simulées en début et fin de journée d'été quand la tache solaire est localisée sur le plancher et en milieu de journée lorsqu'elle est localisée sur les parois. En plus de ces cas, deux des trois stratégies (a et b) ont été testées l'hiver.

Au-delà des résultats obtenus qualifiant l'efficacité ou non de chaque stratégie à travers l'évaluation de la distribution des températures et les vitesses d'air et des débits de ventilations résultants, cette étude a permis de tester toutes les éventualités de renouvellement d'air relatives au système choisi. Cela a ensuite permis de trouver des compromis entre les différentes options afin d'ajuster les débits de ventilation nécessaires pour obtenir des conditions de confort satisfaisantes à travers un système de gestion automatisé gérant les ouvrants.

Dans le domaine des atriums, ce genre d'étude, comme tant d'autres, permet de d'apporter des réponses précises sur la pertinence des choix pour lesquels le concepteur aura à opter et pour lesquels il sera amené à trancher. La préoccupation majeure à laquelle celui-ci est confronté concerne les conditions de confort. Ces derniers dépendent des paramètres qui sont liés à des considérations constructives (orientation, composition des parois, taux d'ouverture ... etc.) que le concepteur manipule mais dont l'influence doit être vérifiée par la simulation. Certes, il est bien évident que chaque atrium est, de par sa conception, un cas particulier comme en témoigne les diverses études que nous avons trouvées à ce sujet [Scudo et al. 1987, Drake et al. 1989, Hiwatashi et al. 1996, Hansen et al. 2000, Kuwahara et al. 2000]. Cependant, la nature des préoccupations se ressemble dans la mesure où elles sont toutes consacrées à étudier la stratégie de ventilation à mettre en œuvre et les divers paramètres sous-jacents dont elle dépend (positions des ouvrants, exposition au vent...etc.).

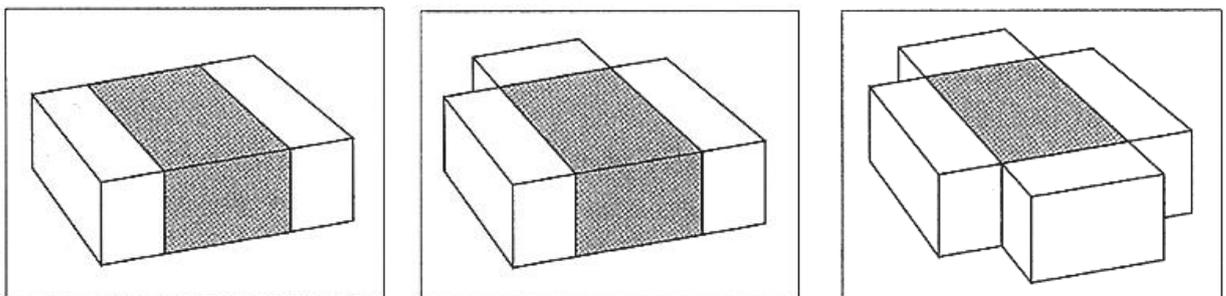
#### **III.4.4. Etudes paramétriques :**

Dans le lot des études consacrées aux atriums, on retrouve certaines études paramétriques qui se focalisent sur l'analyse des sensibilités des paramètres entrant en compte dans la conception sur le comportement. Les paramètres étudiés sont souvent

d'ordre architectural. Ces études sont généralement menées sur des géométries fictives (cas théoriques) est n'ont d'objectif que de mettre en évidence l'influence de chaque paramètre ainsi que la combinaison des paramètres entre eux sur les ambiances thermiques. Cela suppose que ces derniers soient testés sur un même bâtiment. Dans certains cas, une analyse peut conduire à comparer les résultats de simulations correspondant à plusieurs formes géométriques. Ces travaux sont généralement menés avec des outils de simulation numériques et débouchent sur la production de règles expertes ou de méthodes simplifiées de pré-dimensionnement.

Parmi les études dédiées à l'analyse paramétrique nous citons l'exemple des travaux de recherche menés par Wall sur les atriums [Wall 1996]. Ces travaux ont été entrepris sur trois formes géométriques distinctes d'atrium théoriques en faisant varier les paramètres suivants :

- la composition des parois internes (afin d'étudier le rôle de l'inertie thermique)
- le type de vitrage utilisé en toiture (afin d'analyser l'influence des conditions d'isolation)
- l'orientation du bâtiment (pour étudier les conditions d'ensoleillement)
- les taux de renouvellement d'air appliqués et les options de ventilation adoptées

**Forme en I****Forme en U****Forme en O****Figure III. 12: les trois formes d'atrium étudiées**

[Wall, 1996]

Même si les moyens utilisés ne permettent pas de prendre en compte les phénomènes des hétérogénéités des températures d'air dans les volumes testés, l'analyse croisée des paramètres cités ci-dessus a permis d'élucider la relation qui existe entre la forme de l'espace et chacun des paramètres (en correspondance avec des conditions climatiques nordiques durant l'été et l'hiver), en se contentant d'une température d'air interne moyenne.

A terme, l'auteur compte traduire les résultats obtenus en établissant des méthodes de calcul simplifiées utilisables en amont lors de l'avant-projet.

De notre point de vue, les études paramétriques sont d'une grande utilité pour produire de la connaissance experte, cependant les moyens à employer doivent être capables de conduire à des analyses fines afin de décrire le plus précisément possible les phénomènes qui se produisent réellement. Sans cela, une analyse paramétrique n'a d'intérêt que de montrer des tendances de comportement et peut de ce fait difficilement se prêter à produire des règles expertes utilisables par un concepteur. Pour établir des lois simplifiées, il est donc nécessaire d'exploiter les retombées de simulations fines. Si nous comparons, à titre exploratoire, les quelques études que nous avons pu rencontrer, nous nous rendons compte que des travaux faits à l'aide de simulations fines (code CFD par exemple) ont plus de portée que celles où les moyens employés sont moins précis ou mal adaptés.

### **III.5. Conclusion :**

Nous avons consacré ce chapitre à établir un état de l'art sur tout ce qui concerne les aspects relatifs au comportement aéraulique des atriums. En premier lieu nous avons essayé d'explorer les stratégies mises en œuvre permettant d'amoindrir les désagréments provoqués par les surchauffes et plus spécialement ceux de la distribution inégale des températures. Constatant que la ventilation naturelle, en tant que moyen de rafraîchissement gratuit, est beaucoup sollicitée pour améliorer le renouvellement d'air et le confort, nous nous sommes attardés sur les éléments capables d'agir sur le pré-dimensionnement d'un système de ventilation naturelle. Ceci a été possible grâce à la méthode développée par Andersen. En l'absence de références traitant du problème de la ventilation naturelle dans un volume soumis à la stratification, nous pensons que cette dernière peut nous être d'une grande utilité lorsqu'il sera question par la suite d'évaluer les capacités de la ventilation naturelle à améliorer le renouvellement d'air.

Nous ne pouvons pas aborder la caractérisation thermo-aéraulique des atriums sans présenter les différents outils qui permettent de prédire leurs comportements. Dans cette partie notre objectif consistait surtout à comparer, à travers les avantages et les inconvénients de chaque catégorie d'outil, les performances et l'aptitude à être employé dans une analyse fine.

Enfin, nous concluons ce chapitre en classifiant l'ensemble des études recueillies lors de notre recherche bibliographique selon leur intérêt. Cela peut nous aider à mieux comprendre en quoi consistent les études dans ce domaine et quelles sont les préoccupations par rapport au sujet que nous traitons.

# CHAPITRE

# IV



**...Investigation**

## IV.1. Introduction :

Dans le but d'entreprendre une analyse paramétrique sur le comportement thermique des atriums, et leurs adaptations dans notre climat méditerranéen, il nous a paru utile d'analyser la réponse thermique d'un exemple construit, en faisant appel à la mesure. Le choix s'est porté sur l'atrium de la Maison De La Culture dans la ville de Jijel.

Le volet pratique de ce travail sera abordé donc, sur la base d'une investigation sur terrain dont l'objectif est d'évaluer le confort thermique à l'intérieur de l'espace atrium vis-à-vis les paramètres constructifs, et des conditions climatiques extérieures. Qui nous permettrons par la suite d'examiner quels sont les effets que produisent les excitations climatiques sur le comportement et la stratification thermique, sous une latitude comme celle de la ville de Jijel.

La méthodologie d'approche de cette phase de la recherche sera basée sur une campagne de mesure qui est répartie sur deux phases une hivernale, et l'autre estivale. Chaque campagne de mesure s'étale sur des périodes qui représentent l'état extrême pour chaque phase, avec des scénarios différents. Deux axes comportant chacun trois stations réparties verticalement par niveau à l'intérieur de l'espace atrium et dans les coursives, plus celles des espaces adjacents des niveaux supérieurs, on fait l'objet de cette campagne.

Les instruments utilisés consistent en des thermo-hygromètres qui permettent de mesurer la température de l'air et l'humidité relative, ainsi qu'un anémomètre pour les mesures du vent.

## IV.2. Situation de la ville de Jijel :

Jijel ou djidjel ville du nord-est de l'Algérie situé entre les méridiens 5° 25 et 6°30 Est de Greenwich, et entre les parallèles 36°10 et 36°50, hémisphère Nord. Elle est située à 360km à l'Est de la capitale Alger. La Wilaya de Jijel s'étend sur une superficie de 2398,69 km<sup>2</sup> avec une façade maritime de 120 km.

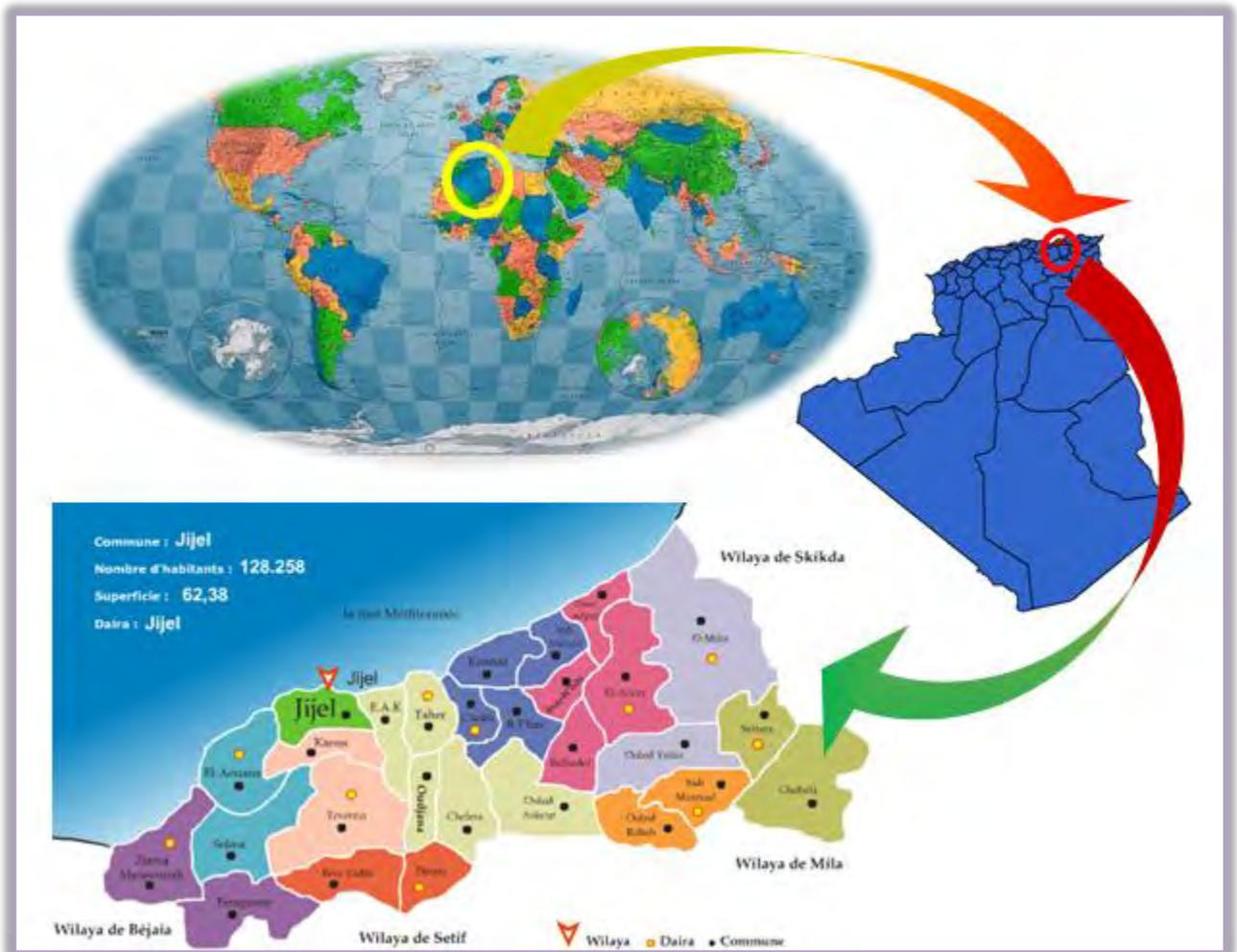


Figure IV. 1 : Situation géographique de la ville de Jijel

[Source : [www.eden-algerie.com](http://www.eden-algerie.com)/[www.astroshop.de](http://www.astroshop.de)/[www.wilayadejijel.net](http://www.wilayadejijel.net) adaptée par l'auteur 2009]

### IV.3. Contexte climatique :

La région de Jijel présente, par sa situation au bord du littoral, la totalité des caractéristiques climatologiques des régions méditerranéennes maritimes. Elle est considérée parmi les régions les plus pluvieuses de l'Algérie. Elle appartient au climat méditerranéen, pluvieux et doux en hiver, chaud et humide en été. Elle fait partie de la zone climatique:

- **D'hiver  $H_{1A}$  littoral-mer** : qui a des hivers doux avec des amplitudes faibles.
- **D'été  $E_1$  littoral** : qui a des étés chauds et humides, l'écart de température diurne est faible.

Le plus souvent, on observe une transition brutale entre les saisons. Les pluies hivernales surviennent au mi- automne. Le printemps est clément, marqué par un beau temps et des températures douces et des journées ensoleillées étant alors très largement majoritaires. Le climat ne se stabilise qu'à la fin du mois de Mai où il devient chaud et humide.

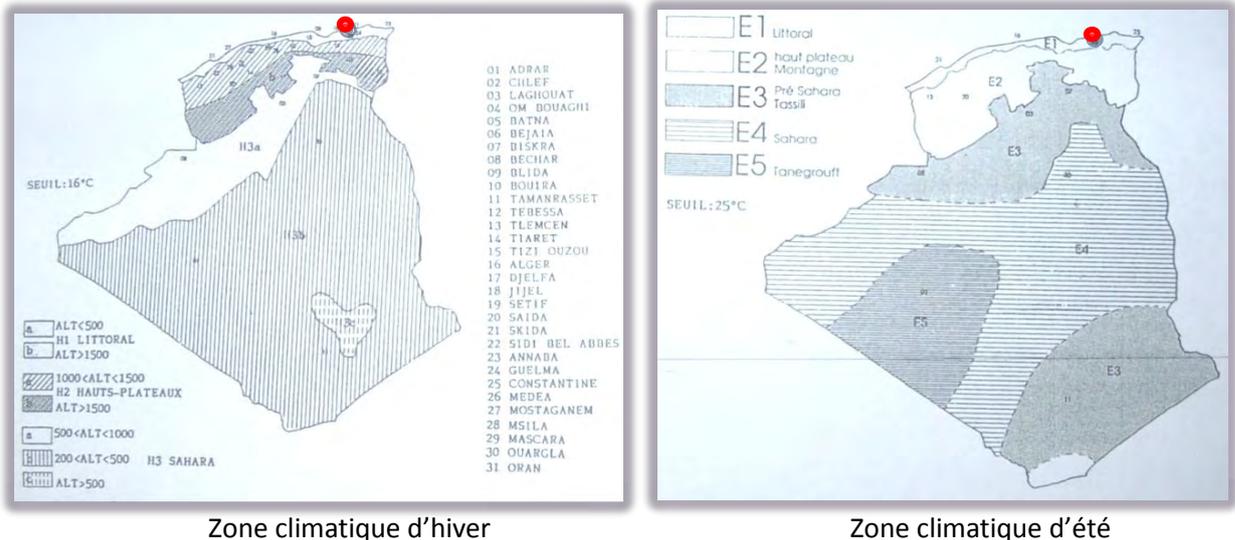
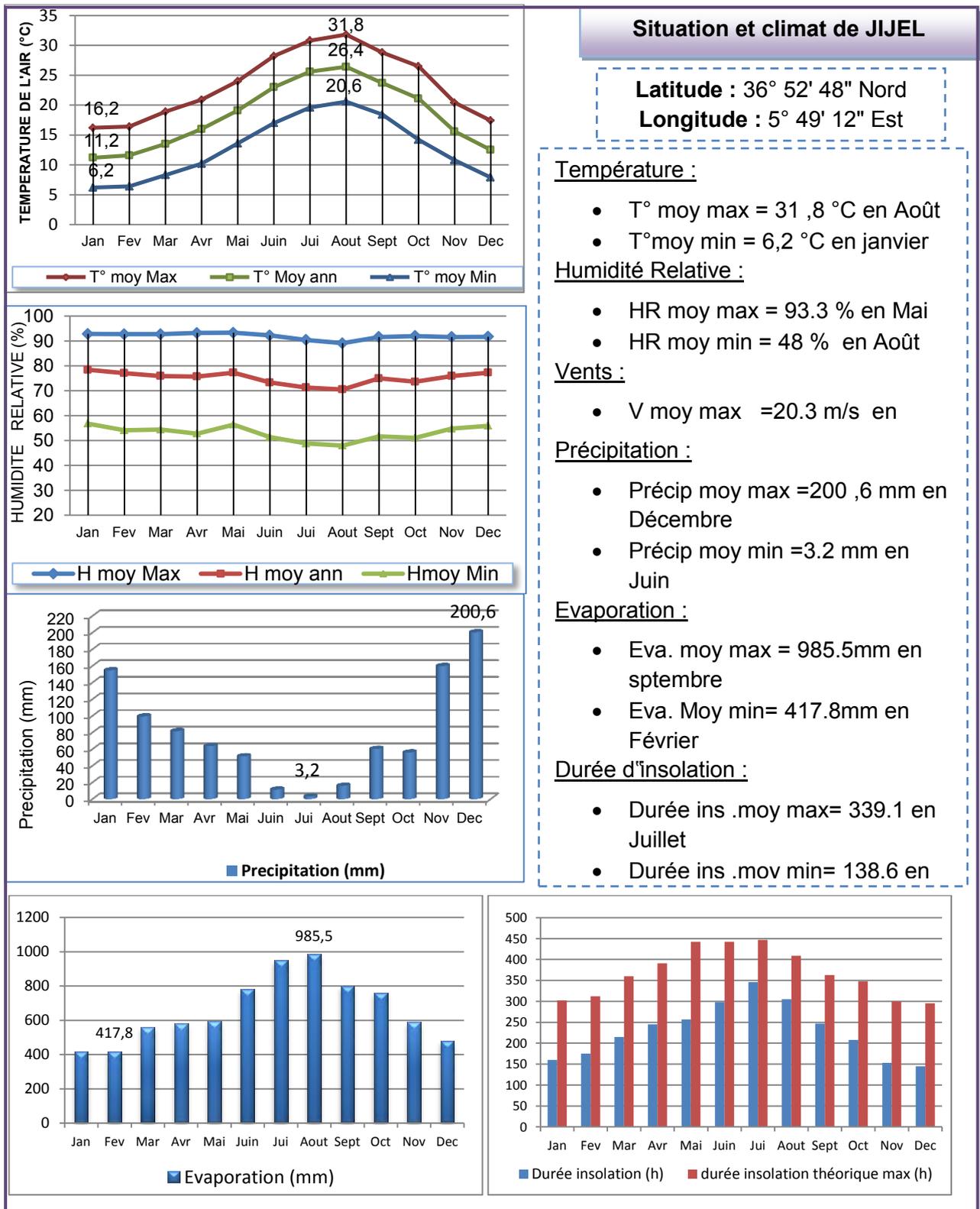


Figure IV. 2 : Situation de la ville de Jijel par rapport aux zones climatiques

[Source: Ministère de l'habitat 1993]

#### IV.4. Analyse climatique de la ville de Jijel :

A fin de mieux caractériser le climat de la ville de Jijel, il est utile d'analyser les différentes paramètres qui le constituent, en interprétant les données météorologiques qui s'étale sur une période de dix ans, relatives à la période (1999-2008).



**Figure IV. 3 : Interprétation des données météorologiques de la ville de Jijel**  
**Période 1999-2008**

[Source: ONM Jijel 2009, réadapté par auteur]

- **Température de l'air :**

D'après le graphe des températures moyennes mensuelles sur Dix ans la courbe des températures moyennes mensuelles évolue d'une manière régulière et la température moyenne annuelle est de 18,3 °C. La température moyenne la plus basse est de 6,2°C en janvier, le mois le plus froid, alors que la température moyenne la plus importante est de 31,8 °C en Août, considérée comme étant le mois le plus chaud.

Les écarts types sont un peu contrastés entre eux mais importants avec une amplitude moyenne annuelle de 18.1°C, ce qui distingue la période chaude de la période douce :

- La période chaude qui s'étend du mois de juin jusqu'au mois de septembre où la température moyenne varie entre 23,0°C et 26,4°C et les températures les plus élevées sont enregistrées en Août avec un max de 31,8°C.
- Une période douce plus longue qui s'étend du mois d'octobre jusqu'au mois de Mai où les températures moyennes varient entre 11,2°C et 21,1°C, avec des températures qui peuvent atteindre un minimum de 6,2°C en janvier, qui est le mois le plus froid. Ces températures adoucies sont dues entre autres à la proximité du littoral.

- **L'humidité de l'air :**

On remarque d'après le graphe que les fluctuations au niveau des courbes des moyennes des humidités relatives, ne sont pas importantes et que les valeurs de cette dernière sont comprises entre 78,4% et 70,5% avec des pics qui peuvent atteindre les 90%, elle est plus important en hiver que en été. Ce qui suggère que le climat de la ville de Jijel soit :

- Humide et chaud en été.
- Humide et doux en hiver.

- **Les précipitations :**

La répartition annuelle des précipitations à Jijel est marquée par une courte période de sécheresse dans le mois de Juillet et Août ; une période où les précipitations sont modérées le mois de mai, juin, septembre ; et une autre période où les précipitations sont abondantes, du mois d'octobre à avril. Le mois le plus pluvieux est celui de décembre avec

une quantité de 200,6mm. Celui de juin est le plus pauvre en termes de précipitation avec seulement 3,2mm. Le total des précipitations annuelles est de 959,5mm.

- **L'évaporation :**

Le taux d'évaporation s'accroît progressivement du mois le plus froid vers celui le plus chaud. La période d'été représenté un taux d'évaporation élevé. Le taux d'évaporation le plus élevé est enregistré le mois d'Août ; car c'est le plus chaud et les radiations solaires y sont maximales. Le taux d'évaporation le plus bas est enregistré au mois de janvier ; car c'est le plus froid et les radiations solaires y sont minimales.

- **Durée d'insolation :**

La durée d'insolation est mesurée à l'aide de l'héliographe, et représente la durée pendant laquelle nous recevons des rayons solaires. L'insolation maximale théorique est la durée d'insolation mesurée à l'aide des calculs astronomiques et représente la durée entre le lever et le coucher du soleil. Elle est exprimée en heures.

- ✓ La durée d'insolation s'accroît du mois le plus froid vers celui le plus chaud.
- ✓ L'insolation maximale est enregistrée au mois de juillet avec une durée de 339 heures.
- ✓ L'insolation minimale par contre est enregistrée au mois de décembre avec une valeur de 138 heures.

En comparant cette durée d'insolation théorique avec celle de Jijel, on peut en déduire que le climat de Jijel est tempéré et doux en hiver comme en été. A partir des données précédentes, il ressort que la ville de Jijel jouit d'un climat méditerranéen (littoral) caractérisé par :

- ✓ Des hivers relativement doux, humides et pluvieux avec des amplitudes faibles.
- ✓ Des étés chauds et humides avec un écart de températures diurne très faible.

- **Le vent :**

Le vent est généralement le bienvenu en été, particulièrement en ambiance humide car il rafraichit l'atmosphère et chasse les humidités, tandis que les vents d'hiver sont des sources importantes de refroidissement [DEHERDE.A. (2005)].

Les vents qui prédominent à Jijel sont de direction sud et sud-ouest en été, ouest et nord-ouest en hiver avec des vitesses moyennes maximale varie entre 20,3 m/s au mois de Décembre et 17,8m/s au mois de Mars., ces vents sont froids en hiver, chauds en été et toujours humides. Pour la saison estivale, la vitesse maximale du vent varie entre 14,9m/s au mois d'août et 18,2m/s au mois de septembre. Alors que les brises d'été sont de direction Nord et Nord-est, qui sont les plus favorables pour la ventilation naturelle.

La courbe des vitesses des vents est irrégulière ; d'où en remarque :

- ✓ Une certaine stabilité du mois de Janvier jusqu'au mois de Mars,
- ✓ Une légère hausse au mois d'Avril puis une chute jusqu'au mois d'août et enfin un accroissement à nouveau au mois de Décembre.
- ✓ Les vitesses moyennes varient entre 2m/s au mois d'août et 2,7m/s au mois de septembre avec une moyenne annuelle de 2,3m/s.

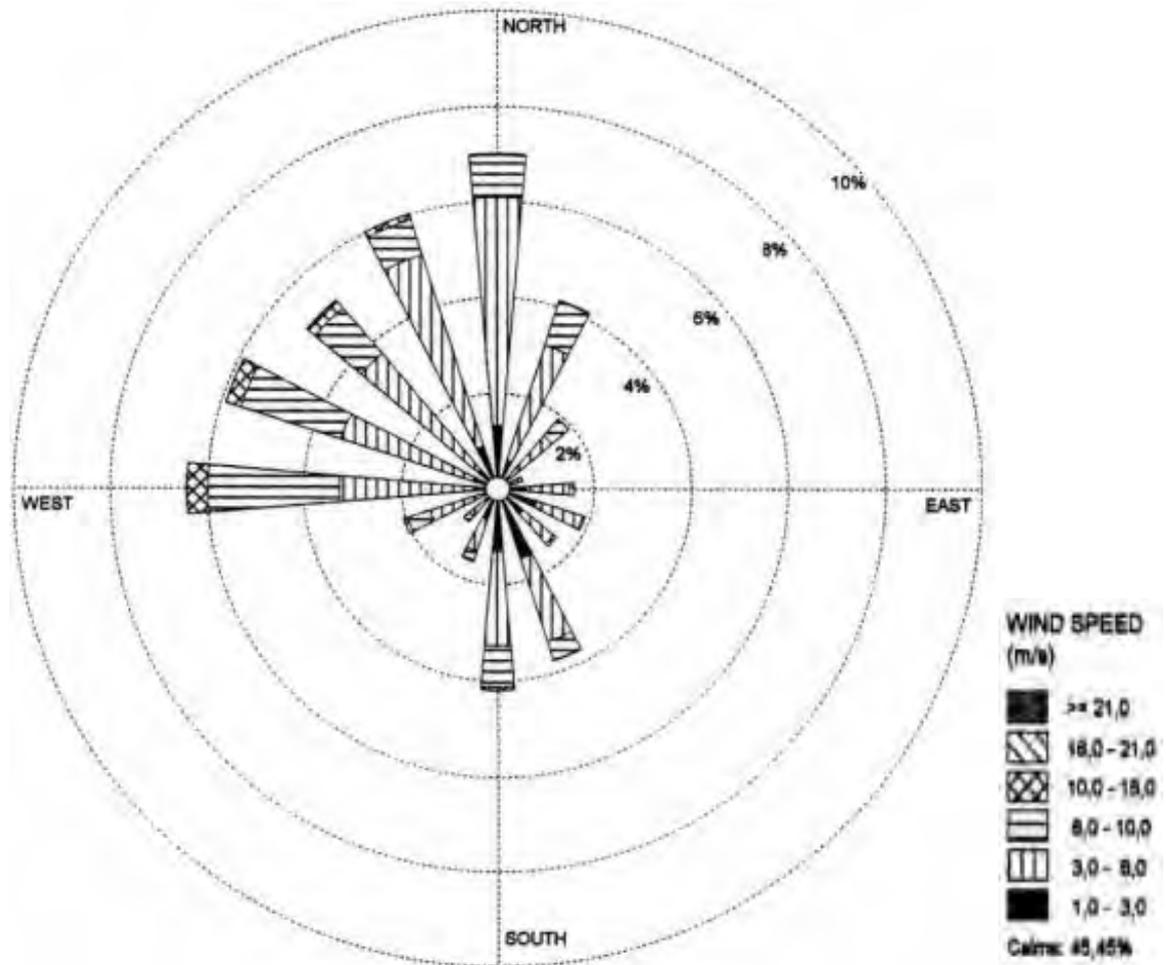


Figure IV. 4 : la rose des vents annuelle 1999-2008

[Source: ONM Jijel 2009]

- **La rose des vents de Jijel :**

D'après la rose des vents établie par le service spécialisés de la station météorologique de Jijel durant la période de 1 Janvier 1999 au 31 Décembre 2008, on peut déduire :

- ✓ Les vents dominant de l'hiver de direction N à O.
- ✓ La fréquence des vitesses du vent est répartie par classe comme suit :
  - 1 à 3 m/s : 11.1%
  - 3 à 6 m/s : 30.5%
  - 6 à 10 m/s : 11.6%
  - 10 à 16 m/s : 1.4%
  - Pour la direction nord classe 3 à 6 m/s la fréquence est 4.76%
  - La fréquence des vents calmes est de 45.45%
  - La fréquence des vents forts est de 1.4%

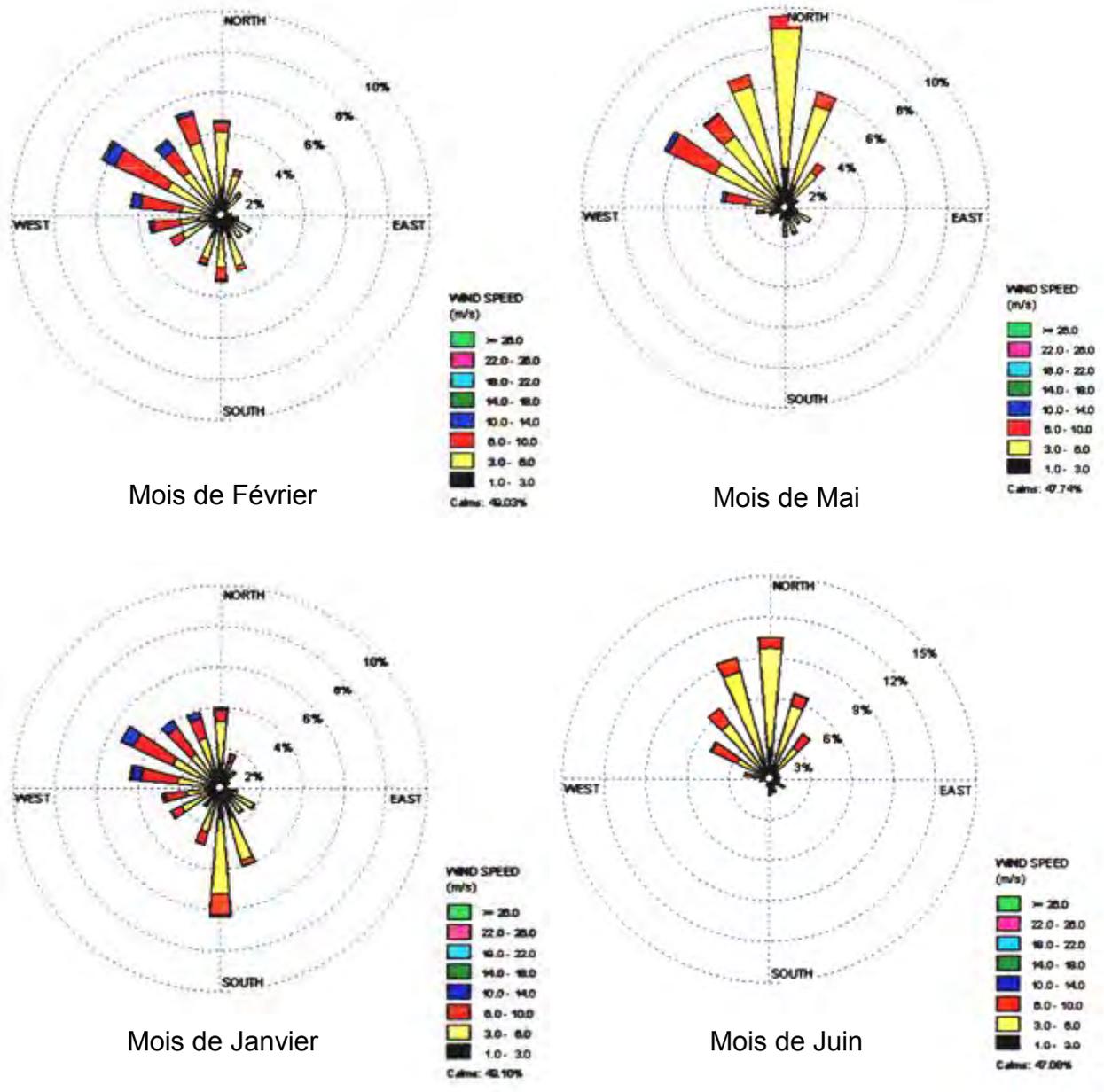


Figure IV. 5 : la rose des vents mensuelle, période 1988-2007

[Source: ONM Jijel 2009]

• **Indice d'aridité de « MARTONE » :**

Le calcul de l'indice d'aridité  $I_m$ , d'après la formule de Martonne qui est égal à :

$$I_m = P / (T + 10)$$

$I_m$ : indice d'aridité.

P : précipitations annuelles.

T : température moyenne annuelle.

$$I_m = 959,5 / (18,3 + 10) = 33,9$$

$$I_m = 33,9 \text{ donc } I_m > 30$$

Donc le climat de Jijel à travers les données est un climat humide

#### IV.5. Présentation du cas d'étude :

Le choix du cas d'étude s'est porté sur l'atrium de la maison de la culture **OMAR OUSSEDIK** de la ville de Jijel, construction moderne qui date de 2007 situé sur la colline d'EL-AAKABI au coté Sud-est de la ville, sur une altitude de 60m, car celui-ci a l'avantage d'être situé dans une région assez chaude l'été, et sa situation sur une colline bien dégagée et exposée directement aux conditions climatiques et qui diminue bien évidemment l'effet de son entourage sur son comportement thermique, tels que l'ombre portée des constructions adjacents ou bien des couloirs d'air qui peuvent être canalisés par ces dernier, et le fait d'être accessible durant la période estivale ainsi la coopération dévoilée de la part du personnel de la maison qui facilite ainsi le déroulement de la campagne de mesure c'est l'autre raison qui a motivé ce choix.





**Figure IV. 6 : Situation de la maison de la culture (cas d'étude)**

[Source: Google Earth 2009]

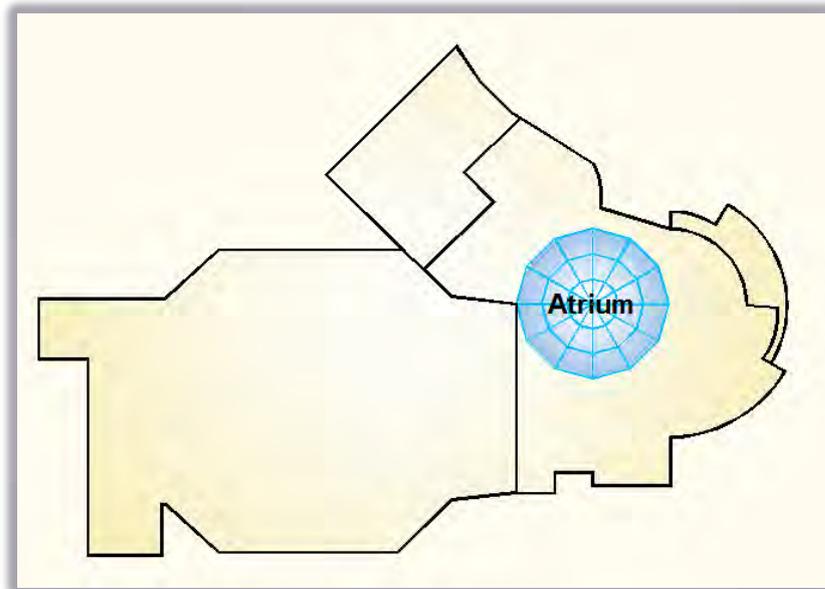


**Figure IV. 7 : Maquette et vue sur la maison de la culture**

[Source : auteur 2009]

La construction est en monobloc à trois niveaux (R+2), avec un procédé de construction système traditionnelle (poteau-poutre), et remplissages briques. Double paroi en brique et lame d'air pour les murs extérieurs.

L'atrium représente le Hall central du bâtiment, espace de circulation et d'exposition, il a une forme cylindrique entourée par des coursives qui desservent les espaces adjacents, la majorité de ces espaces ne sont pas conçus pour recevoir la lumière de l'atrium, Le volume de l'atrium est de  $2844,62\text{m}^3$  couvert à 100% par une coupole vitrée (de 15.5 m de diamètre. Et 4m de hauteur). La typologie de l'atrium s'intègre dans le type central suivant la typologie générale des atriums établie par [Belmaaziz, 2003] (Figure IV.8), et dans le type n°4 suivant la classification établie par [Yoshino, 1995]. (Voir chapitre I).



**Figure IV. 8: position de l'atrium cas d'étude**

[Source : auteur 2009]



Figure IV. 9 : les différents niveaux du bâtiment

[Source : auteur 2010]



Figure IV. 10: vue en coupe de l'atrium

[Source : auteur 2009]



Figure IV. 11: Verrière décorée, coupole de l'atrium

[Source : auteur 2/11/2009]

## IV.6. Objectif de la campagne de mesures :

Le but de la campagne de mesures est d'examiner le comportement thermique de l'espace atrium pendant les deux périodes estivale (été 2009, et 2010), et hivernale (hiver 2010) à travers la prise de mesures et l'évaluation des données paramétriques de l'ambiance thermique enregistrées à l'intérieur de l'espace atrium.

### IV.6.1. Paramètres mesurés :

Les variables environnementales qui sont importantes pour le confort thermique humain englobent le rayonnement solaire, les températures des surfaces, la température de l'air, la vitesse du vent, et l'humidité (Herrington, 1978 ; Akbari, 1992).

Pour notre campagne de mesures : il s'agit de mesurer les trois paramètres ayant une incidence directe sur le confort thermique :

- La température de l'air en (°C)
- L'humidité relative de l'air en (%)
- Le vent (m/s)

### IV.6.2. Description de système de mesure :

Le fait que la campagne de mesures s'effectue sur plusieurs stations de mesure, L'acquisition des données a été faite à partir d'un certain nombre de matériel. La campagne de mesure s'étale sur plusieurs stations, et par manque d'appareils de même modèle qui pouvant recouvrir toutes les stations prévues, on a eu recours donc à un certain nombre d'appareils différents, mais qui mesurent les mêmes paramètres, (thermo-hygromètre, une station météo, un instrument portable (Central Météo), et un anémomètre pour les mesures du vent) (tableau IV.1). De ce fait, un étalonnage de précision est envisagé entre ces différents instruments, et même avec les appareils de la station météo, pour éviter le décalage qui peut se présenter entre les valeurs enregistrées, et par suite, de les prendre en considération plus tard dans les valeurs des résultats.

Tableau IV. 1: les instruments de mesure utilise dans l’investigation

[Source : auteur 2010]

Les instruments de mesures		Description
<p>METER Velleman environnement numérique</p>		<p>Thermo-hygromètre :  Temp (° C)/ HR (%) / dB / LUX</p>
<p>HYGROMETRE HD 8501 H</p>		<p>Thermo-hygromètre :  Temp (° C)/ HR (%)</p>
<p>Central Météo« OTIO et THERMOTECH » modèle 94030</p>		<p>Thermo-hygromètre :  Temp (° C)/ HR (%)</p>
<p>Station météo SMV sans fil WMR928NX</p>		<p>Temp (° C)/ HR (%)</p>

<p>Anémomètre LT Lutron LM-8000</p>		<p>Anémomètre : Temp (° C)/ HR (%)/vitesse de vent (m/s)</p>
---	--	--

#### IV.6.3. Méthodologie et déroulement de la campagne de mesures :

Afin de déterminer le comportement thermique de l'espace atrium, les mesures pour les deux périodes (estivale et hivernale) doivent être sélectionnées parmi les mois les plus représentatifs des périodes chaudes et froides. Cependant les mois qui correspondent à ces périodes sont les mois de Juillet et Août (été 2009), Août (été 2010) et le mois le plus froid de la période hivernale correspondant au mois de Février (hiver 2010). La durée de la campagne de mesures s'étale sur 4 périodes suivant les mois choisis, dont chaque période représente une durée de 3 à 4 jours successifs.

La méthodologie de travail est basée sur la collecte des données paramétriques de l'ambiance interne de l'espace atrium à travers les différentes stations, à l'aide des instruments mobiles.

L'investigation s'est basée sur :

- Pour la période estivale (été 2009/2010) :
  - 7 stations de mesures été 2009, et 9 stations été 2010.
  - 3 cas (scénarios) différents.
- Pour la période hivernale (hiver 2010) :
  - 9 stations de mesures.
  - 2 cas (scénarios) différents.

**IV.6.4. Les stations de mesures :**

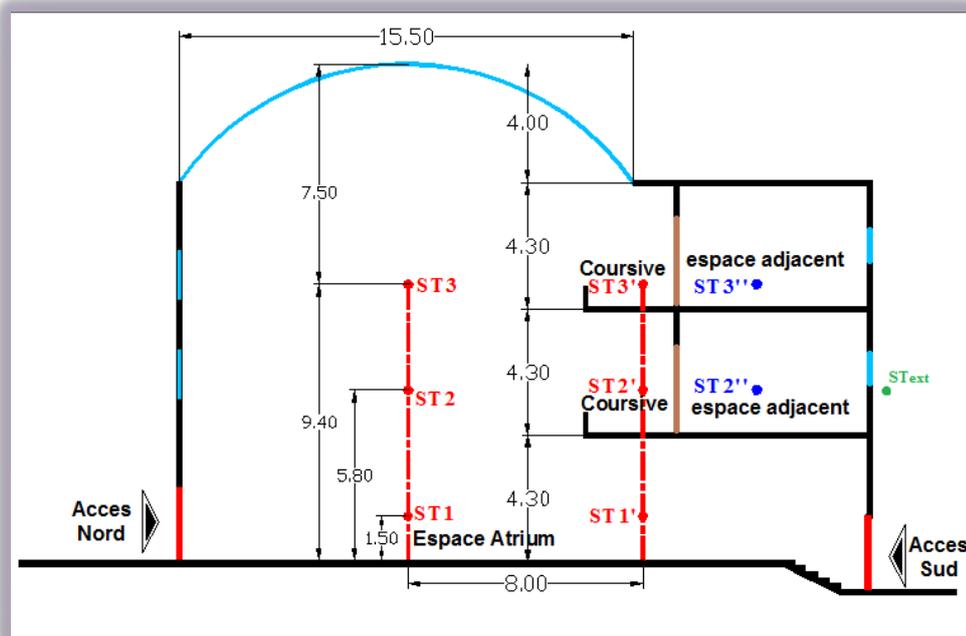
La collecte des données est faite à travers 7 à 9 stations de mesures soigneusement sélectionnées, 6 stations réparties verticalement sur 3 niveaux, et suivant deux axes différents, un axe central (au centre de l'atrium), et un autre latéral (dans les coursives), la distance entre les deux axes est de 8m (Figure IV.12). Les hauteurs des stations sont successivement (ST1, ST1'') 1,5m, ( ST2, ST2'') 5,8m, et (ST3, ST3'') 9,40, ST2''', et ST3''' successivement dans les espaces adjacents de 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> étage... (Tableau IV.2), SText, station à l'extérieur.

**Tableau IV. 2: hauteurs des stations de mesure**

[Source : auteur 2010]

Stations	dans le vide l'atrium			dans les coursives			dans les espaces adjacents		L'extérieur
	1	2	3	1''	2''	3''	2'''	3'''	ext
H(m)	1,50	5,80	9,40	1,50	5,80	9,40	5,80	9,40	5,80

Vu que c'est un équipement public, les mesures sont limitées à une période de 8.00h à 17.00h, qui correspond à la période d'occupation des lieux, la collecte des données se fait chaque heure.



**Figure IV. 12 :l'emplacement de différentes stations de mesures**

[Source : auteur 2009]

Les mesures se sont déroulées suivant 3 scénarios différents pour la saison estivale (les Cas 1, 2, 3), et deux cas pour la saison hivernale (cas 5, et 6). (Figure IV.13)

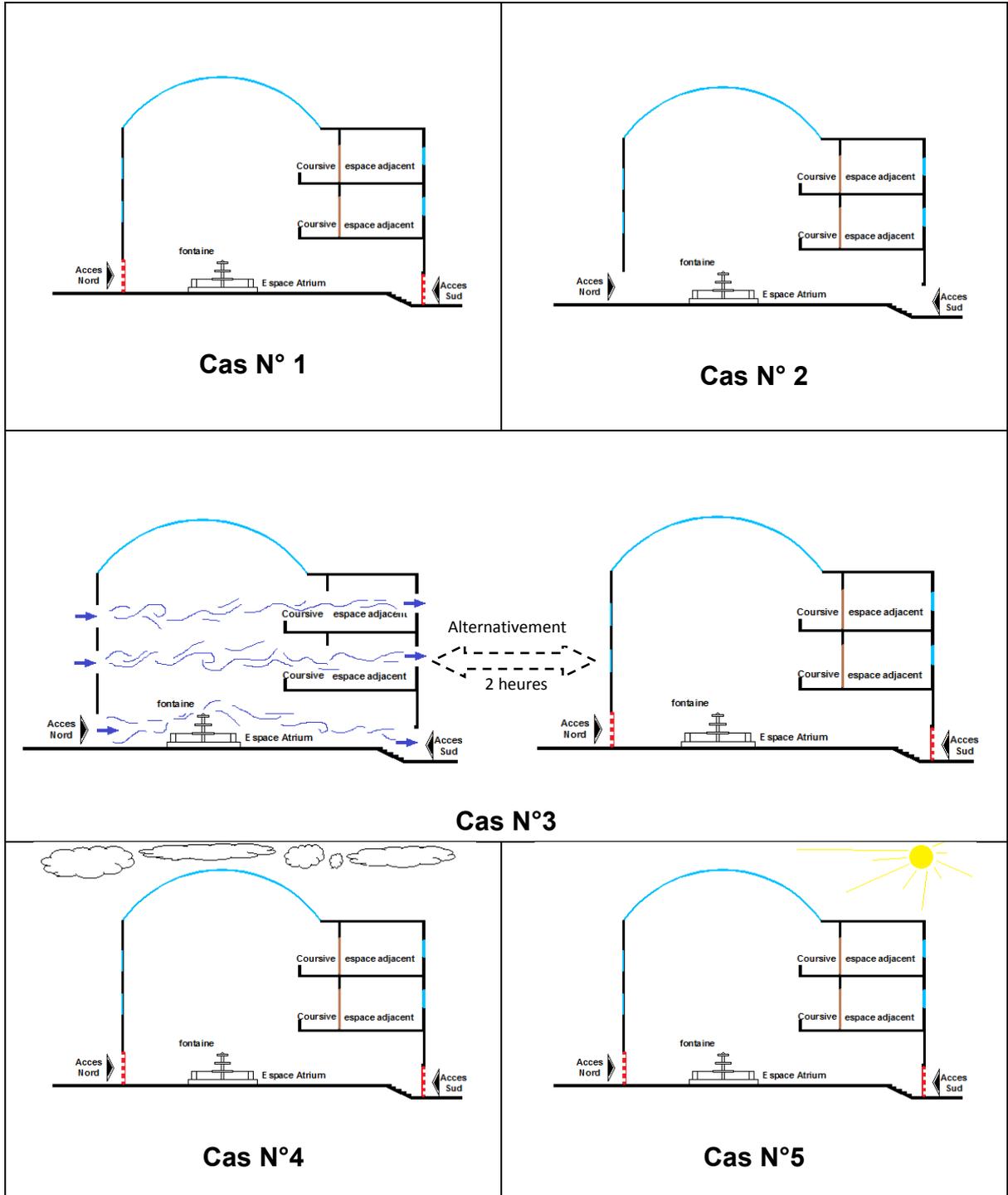


Figure IV. 13 : Les différents Cas mesuré

[Source : auteur 2009]

- **Cas N° 1** : représente le cas des deux portes fermées sans ventilation.
- **Cas N° 2** : représente le cas où les portes au niveau du Rez-de-chaussée sont ouvertes (ventilation transversale)
- **Cas N° 3** : représente le cas d'une ventilation transversale dans chaque niveau
- **Cas N° 4** : cas d'une journée à ciel couvert sans soleil.
- **Cas N° 5** : cas d'une journée ensoleillée.

## IV.7. Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus lors de la prise de mesures durant les deux périodes, estivale (juillet et Août) et hivernale (février) des températures, d'humidités, et du vent, à l'intérieur et à l'extérieur de l'espace atrium ainsi que ceux communiqués par la station météo de Jijel ont fait l'objet d'analyse et de comparaison.

### IV.7.1. Saison estivale : (été 2009 et 2010)

Les mesures pour la saison estivale sont faites durant les deux mois de Juillet 2009, Août 2009 et 2010:

- 3 jours du mois de juillet (20, 21,22 juillet 2009), et 3 jours du mois d'août 2009 et 4 jours du mois d'août 2010, avec des scénarios différents [(20 juillet 2009 et 18 août 2009 ; cas 2), (21,22 juillet 2009 et 19 août 2009 ; cas 1), (du 2 au 5 août 2010 ; cas3)]

#### IV.7.1.1. Analyse des résultats de mesure :

##### IV.7.1.1.1. Les résultats de mesures pour le cas N°1 :

Une lecture des températures est faite pour le premier scénario (les deux portes sont fermées) au cours de la journée du 19 août, qu'on a jugé le cas le plus représentatif :

##### a. La température de l'air :

La journée du (19/08/2009) est caractérisée par un ciel clair avec un vent de vitesse moyenne 4,16 m/s du Nord-est, la température diurne varie entre 30,4°C et 39,5°C, avec une amplitude de (9,1°C).

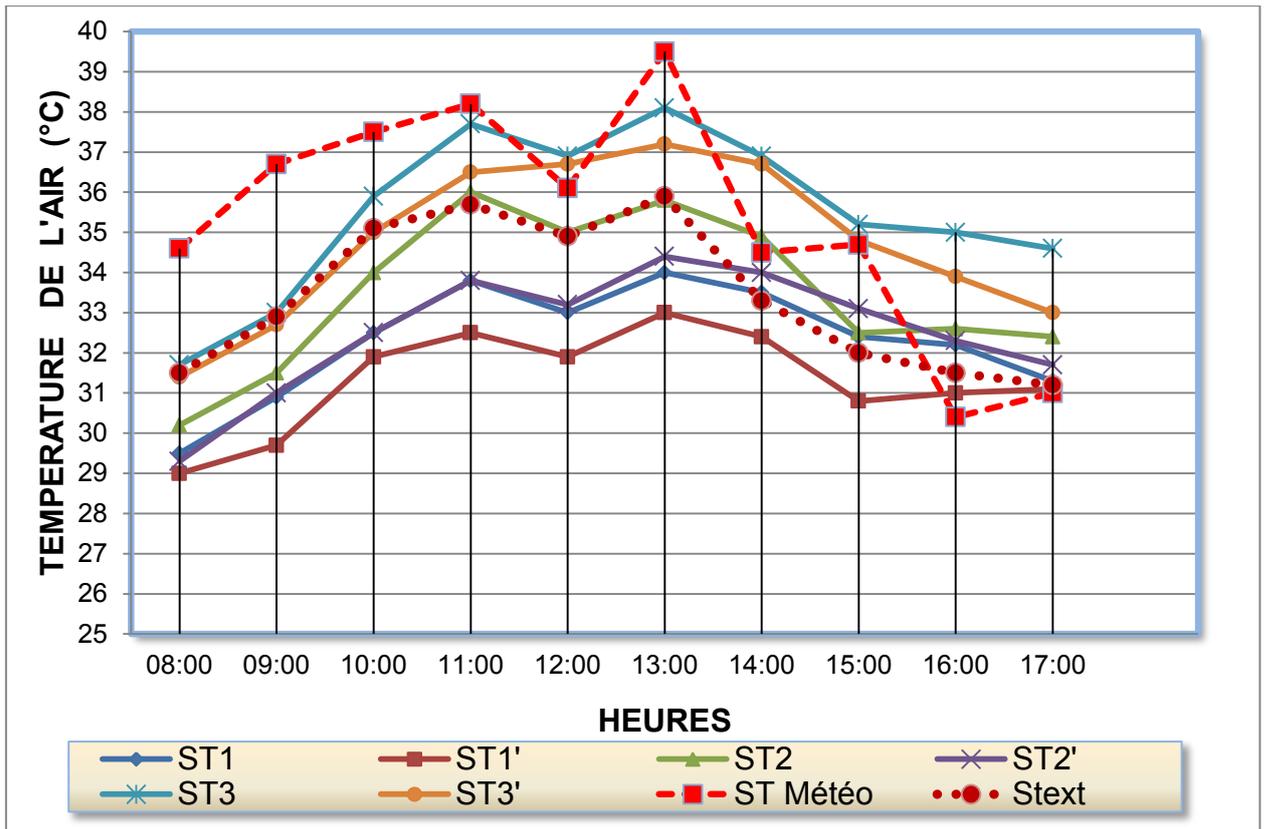


Figure IV. 14: les résultats de la température de l'air de la journée du 19 août 2009 (Cas N°1)

[Source : auteur 2009]

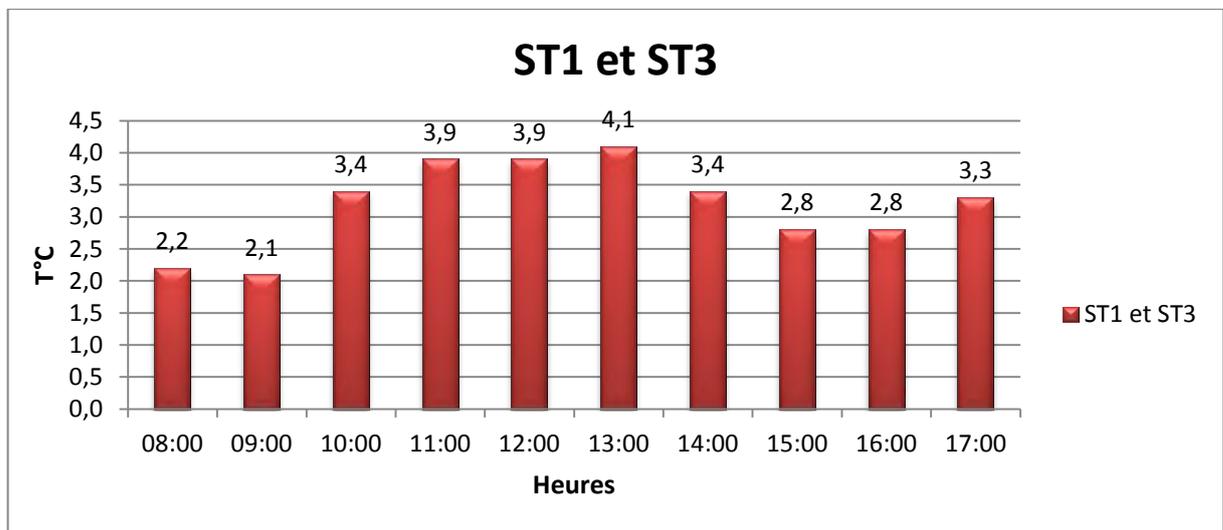


Figure IV. 15: évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°1)

[Source : auteur 2009]

Les profils des températures de l'air à l'intérieur de l'atrium au niveau des différentes stations de mesure suivent la même allure, et se suivent avec la courbe de la température d'air extérieure (Graphe IV.14). La valeur maximale du gradient dans le centre de l'atrium (différence de température entre les stations ST1 et ST3 à 13 :00h) atteint 4,1°C. Cette valeur est attribuée au fait que la température enregistrée par la station ST3 sous le vitrage diverge par rapport au reste des températures enregistrées au niveau bas. Cet écart dépend de la quantité des gains solaires reçus dans chaque niveau, et naturellement, la zone la plus élevée, elle est la plus exposée à ces gains, qui induit la hausse de la température [AYOUB, IZARD, 1994].

La température extérieure mesurée prend la même allure que les températures enregistrées dans l'atrium, avec un pic de 35,9 °C à 13 :00h, alors que les autres pics sont enregistrés à la même heure dans toutes les stations à l'intérieur de l'atrium de (33,0 à 38,1°C).

La température dans les stations ST3, dépasse la température de l'air extérieure durant toute la journée. Par contre la température enregistrée dans les stations ST3" et ST2 dépasse celle de l'extérieur à partir de 11 :00h. Cette surchauffe à l'intérieur de l'atrium est causée par le phénomène de l'effet de serre induit par la surface vitrée de la coupole de l'atrium. C'est le principe du gain solaire tel qu'il existe à travers n'importe quelle surface vitrée. Les matériaux dits transparents ou translucides laissent en grande partie traverser le rayonnement solaire incident. Le rayonnement solaire (de courte longueur d'onde CLO) traverse en partie le vitrage et vient chauffer les matériaux composant les différentes parois (l'enveloppe interne dans le cas d'un atrium) qui l'absorbent. A leur tour, celles-ci émettent un rayonnement de grande longueur d'onde (GLO). La grande particularité du vitrage et qu'il est imperméable à ce type de rayonnement (GLO) émis par les parois ou corps environnants. Ainsi la chaleur ayant pénétré se trouve piégée. Il s'ensuit alors une augmentation de la température ambiante pendant la journée qui conduit à la surchauffe [BELMAAZIZ, 2003].

En effet la lecture des températures est faite durant la période où les deux portes sont fermées, donc une absence totale d'une ventilation naturelle à l'intérieur de l'espace atrium est observée, et une amplitude des surchauffes est enregistrée.

b.L "humidité relative de l'air :

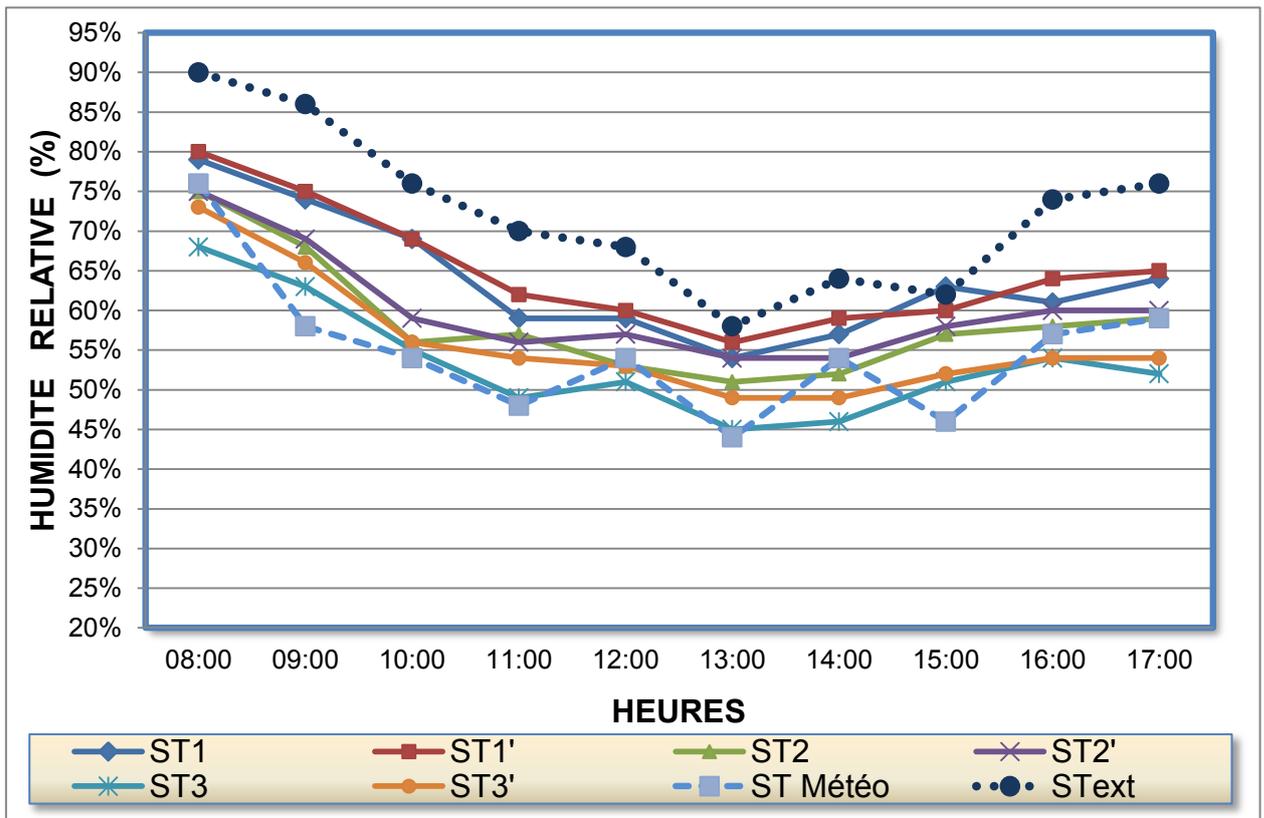


Figure IV. 16:variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 19 août 2009 (Cas N°1)

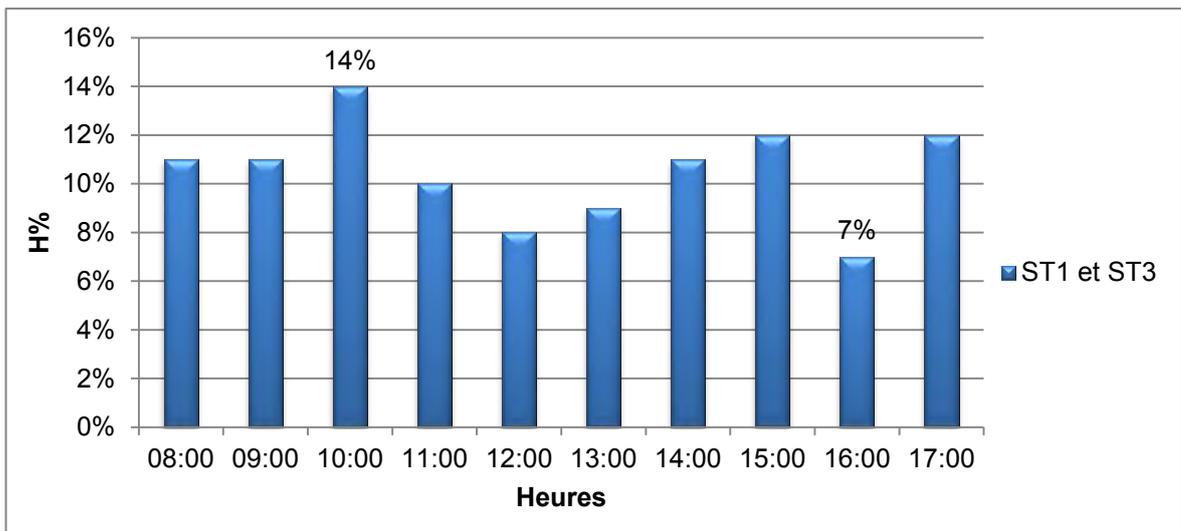
[Source : auteur 2009]

Durant la journée de mesure du 19 Août 2009, les humidités relatives enregistrées par les données météo ont une moyenne diurne de 55%. Qui est une valeur au-dessous de la valeur moyenne saisonnière ( 70,5%), Elles baissent entre (8h) et (13h) avec un maximum de 76% jusqu'à un minimum de 44% (à 13 :00h),et elles commencent a augmenter suivant le coucher du soleil (Figure IV.16). cependant, les humidités relatives mesurées sur les lieux enregistres une valeur saisonnière avec une moyenne diurne de 72,4%. un maximum de 90% enregistré à 8h , et un minimum de 58% à 13h. cet écart entre les valeurs météo et celle mesurée est dû principalement à l'éloignement de la station météo par rapport a la situation du cas d'étude, qui est très proche de la mer, ce qui explique les valeurs élevées enregistrées.

Les humidités relatives enregistrées à l'intérieur de l'espace atrium dans les différentes stations de mesures, tracent des courbes qui suivent la même allure que la courbe des humidités relatives enregistrées à l'extérieur, mais avec des valeurs inférieures.

Les valeurs des humidités relatives maximales à l'intérieur sont enregistrées dans la station ST1" situé au niveau du rez-de-chaussée, avec un maximum de 80% à 8h, et un minimum de 56% à 13h. Et les valeurs minimales sont enregistrées au niveau de la station ST3 situé au dernier étage, avec un maximum de 68% à 8h, et un minimum de 45% à 13h, et un maximum d'écart est enregistré entre les stations ST1 et ST3, d'une valeur de 14% à 10h. (Figure IV.17)

Les valeurs des autres stations se décroissent tout en montant en hauteur. Démontrant ainsi une stratification des humidités relatives en corrélation avec la stratification des températures de l'air déjà constatée dans les mesures des températures.

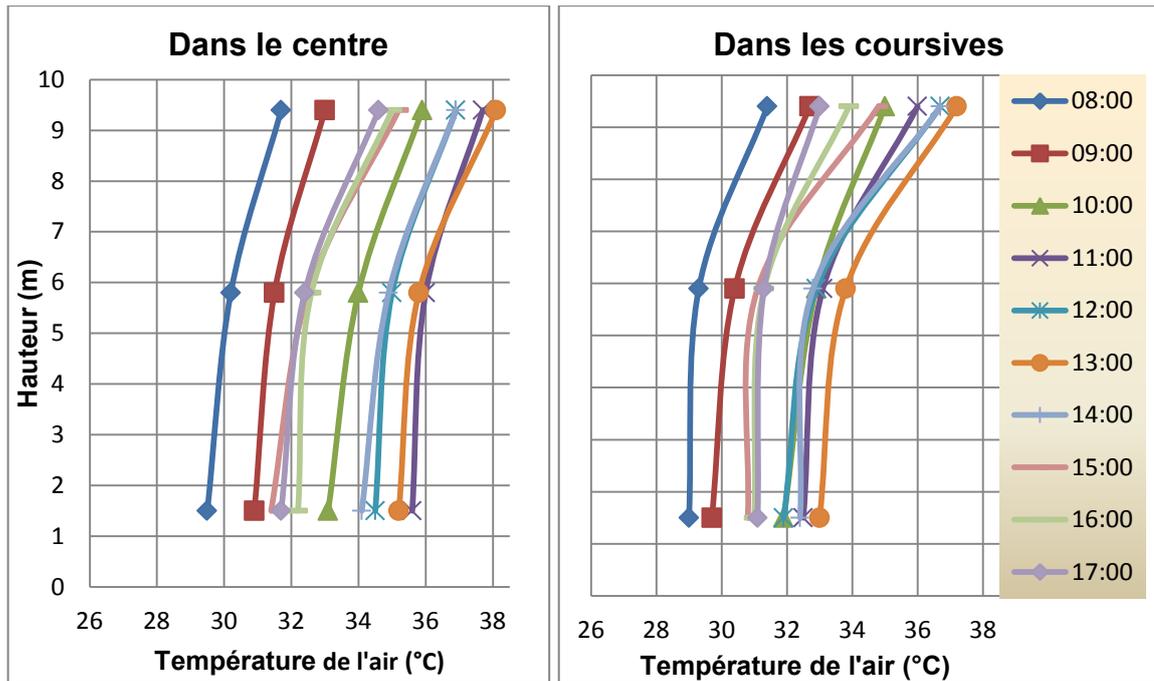


**Figure IV. 17 : évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1 et ST3 (Cas N°1)**

[Source : auteur 2009]

c. Analyse de la stratification thermique :

Le gradient vertical des températures d'air permet l'appréciation de la stratification thermique dans un volume. (Figure IV.18)



**Figure IV. 18 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air (Cas N°1)**

[Source : auteur 2009]

Au vu des profils thermiques verticaux pour les températures de l'air enregistrées au centre de l'atrium, et celles prises dans les coursives, les résultats obtenus correspondent aux cas 2 des gradients verticaux des températures d'air [Heller, 1995] et [Andersen, 1998], qui correspond à une stratification où la source de chaleur se trouve en partie haute. La différence de température entre le point le plus haut et le point le plus bas varie de 1,9 à 4,7°C. L'écart le plus important entre le point le plus haut et le point le plus bas est enregistré à 14 :00h avec une valeur de 4.3 °C dans les coursives. Cette hétérogénéité importante des températures est essentiellement due à une zone d'air très chaude qui se trouve piégée dans la partie située sous la toiture. A ces endroits les températures d'air sont très affectées par les températures de surfaces qui sont élevées. Cette hétérogénéité est beaucoup plus accentuée par l'absence totale d'une échappatoire qui créera sans doute une ventilation naturelle verticale. Donc des fenêtres ouvrantes ou des orifices dans la coupole sont indispensables pour créer cette ventilation et donc éviter la surchauffe enregistrée dans l'espace intérieur de l'atrium.

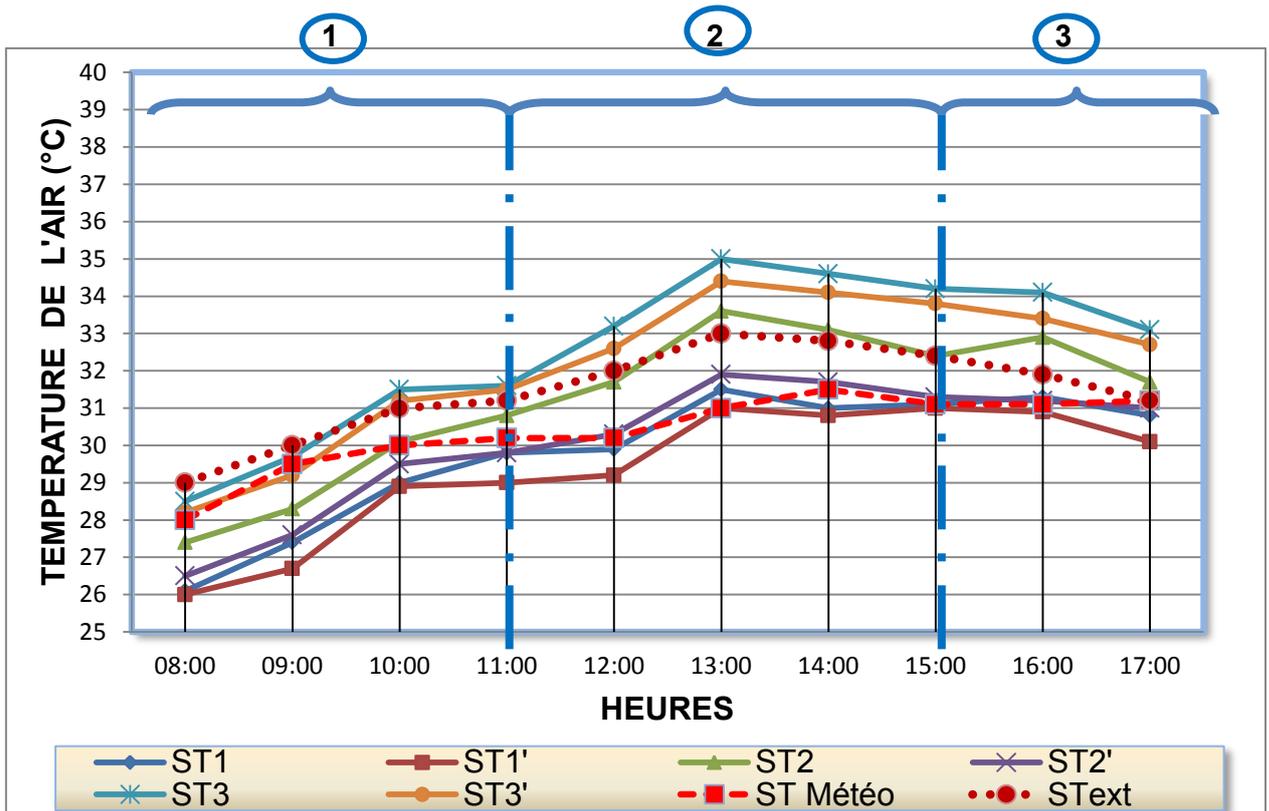
#### I.1.1.1.1. Les résultats de mesures pour le cas N°2 :

Les éléments climatiques comme la température et l'humidité sont mesurés pendant les deux jours d'été le 20 Juillet, et le 18 Août.

Le deuxième scénario pris en considération est le cas N°2 où les deux portes sont ouvertes, permettant ainsi une ventilation transversale.

On a choisi pour l'analyse la journée du 18 Août, parce qu'elle est la plus significative d'une part, elle est la plus chaude, et d'autre part, les résultats des mesures à l'extérieur, sont plus proches des données météo.

a. La température de l'air :



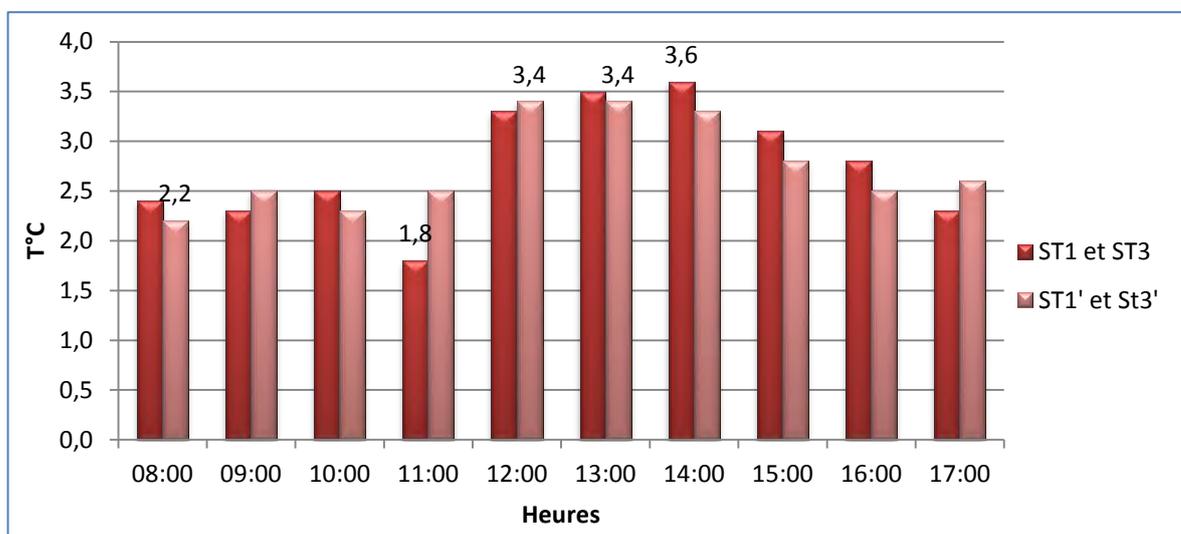
**Figure IV. 19: les résultats de la température de l'air de la journée du 18 août 2009 (Cas N°2)**

[Source : auteur 2009]

La journée de (18/08/2009) est caractérisée par un ciel clair avec un vent faible venant du Nord, Nord-est avec une vitesse moyenne de 3,3 m/s, la température diurne varie entre 28 et 31,5 °C. Avec une amplitude de 3.5°C.

Les profils des températures d'air à l'intérieur de l'atrium dans les différentes stations de mesures suivent le même profil, et se suivent avec les températures de l'air extérieures (Figure IV.19). On observe trois périodes distinctes en corrélation directe avec les gains solaires reçus à travers le vitrage de l'atrium. La première ascendante suivant le lever du

soleil, la deuxième quand le soleil est au zénith, la troisième descendante suivant le coucher du soleil. La valeur maximale du gradient, différence de température entre le niveau le plus bas, et le plus haut (stations ST1 et ST3 à 14 :00h) atteint 3,6°C (Figure IV.20). Cette valeur est attribuée au fait que la température enregistrée par la station ST3 sous le vitrage diverge par rapport au reste des températures enregistrées à d'autres stations. La température extérieure prend la même allure que les températures enregistrées dans l'atrium, cependant elle la dépasse durant les périodes 2 et 3 seulement pour les stations ST2 ; ST3 ; ST3".avec une différence maximale de 2,2 °C entre la température extérieure et celle de la station ST3 enregistrée à 16 :00h. Cela peut être expliqué par la surchauffe causée par la toiture vitrée.

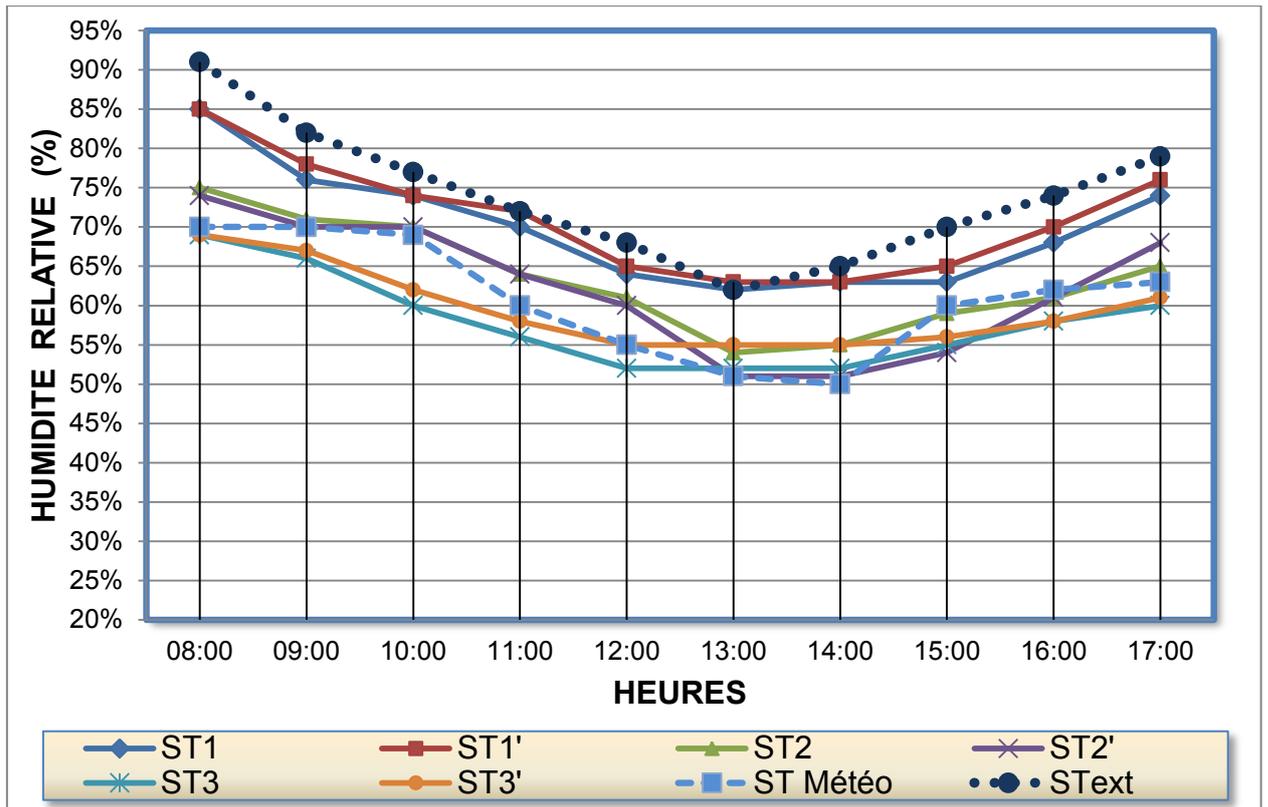


**Figure IV. 20: évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°2)**

[Source : auteur 2009]

#### b. L'humidité relative de l'air :

L'humidité joue un rôle important dans la perception du confort thermique ; elle détermine la capacité d'évaporation de l'air, et par conséquent l'efficacité du refroidissement évaporatif, avec la température elle donne déjà une idée du confort de l'ambiance interne.

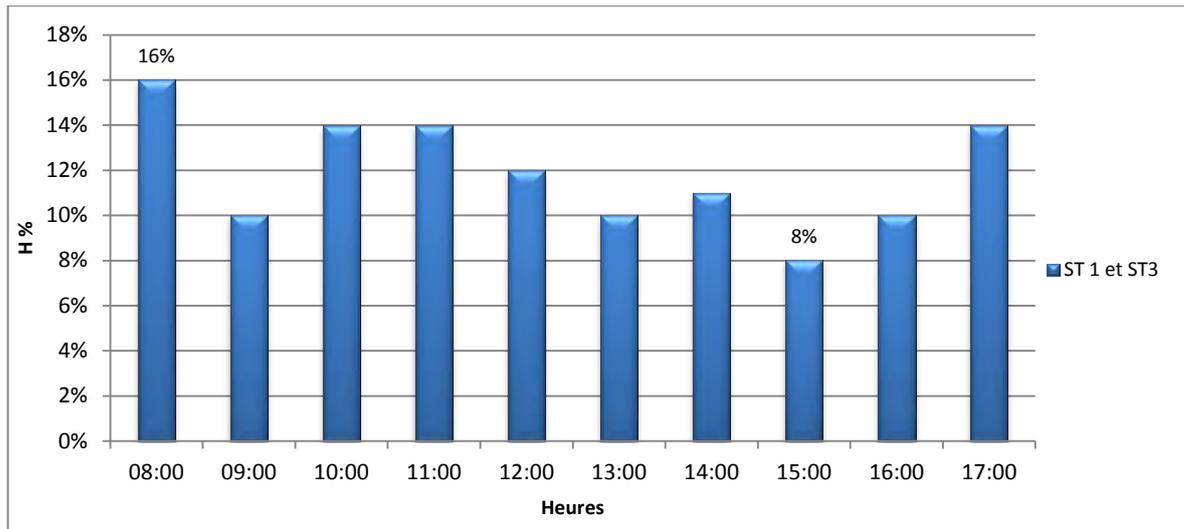


**Figure IV. 21 : variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 18 août 2009 (Cas N°2)**

[Source : auteur 2009]

La variation d'humidité relative de l'air intérieure pour chaque heure est présentée dans la (Figure IV. 21), les courbes des humidités relatives tracent les mêmes allures, elles enregistrent un maximum à 8h, et un minimum à 13h. On constate un écart entre les données de la station météo et celles mesurées à l'extérieur, cela est dû principalement à l'effet différent du micro climat des deux stations).

A partir de 8h, le taux d'humidité commence à baisser dans toutes les stations. Au moment où l'espace reçoit le max maximum des gains solaires de 11h à 14h, on observe une chute du taux d'humidité avec une augmentation de l'écart.



**Figure IV. 22 : évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1et ST3 (Cas N°2)**

[Source : auteur 2009]

Les taux des humidités relatives les plus élevés sont enregistrés au niveau du rez-de-chaussée dans les stations ST1 et ST1", ainsi que les taux les plus bas sont enregistrés dans le niveau haut (ST3, et ST3"), avec un écart maximum de 16% dans l'espace atrium entre les deux stations ST1 et ST3 à 8h. (Figure IV.22)

Ces écarts d'humidité relative enregistrés est dû au phénomène de la stratification thermique dans l'espace atrium, et accentué par la présence d'une ventilation transversale dans le niveau bas.

#### c. Analyse de la stratification thermique :

Les gradients verticaux thermiques en fonction des hauteurs (Figure IV.23), nous permettent d'analyser le phénomène de la stratification thermique présent dans les grands espaces tel que les atriums.

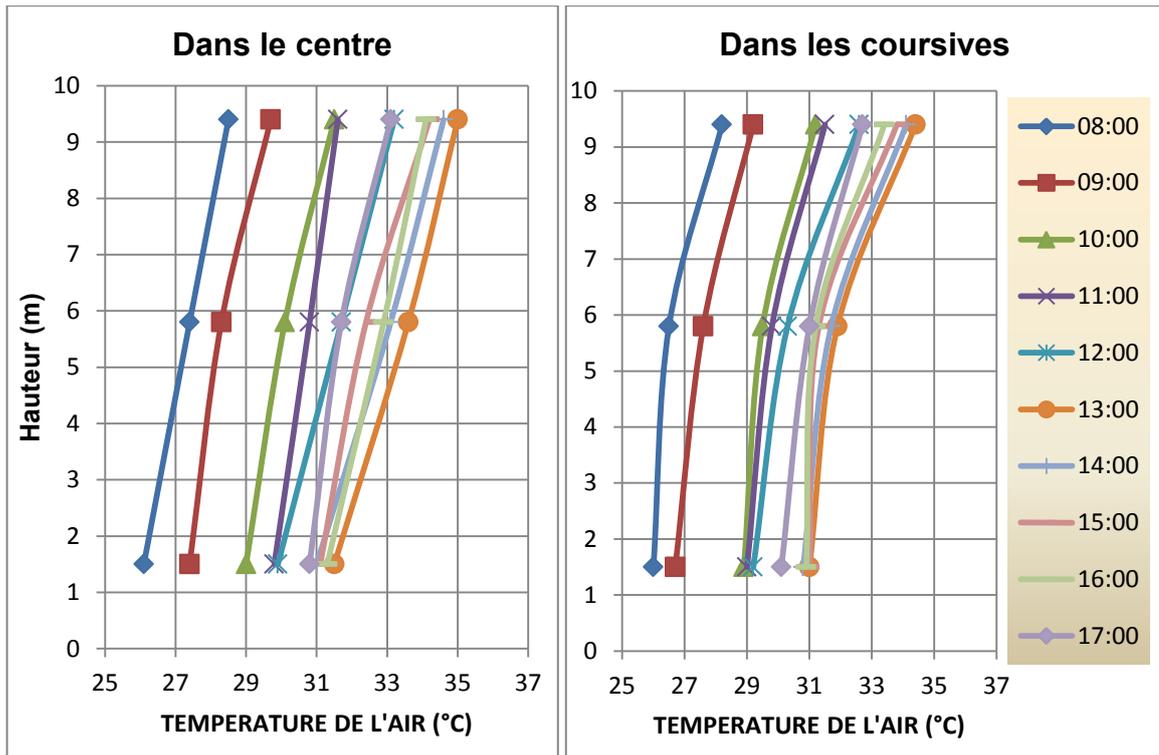


Figure IV. 23 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air (Cas N°2)

[Source : auteur 2009]

Au vu des profils thermiques verticaux, les résultats obtenus semblent, d'une manière générale, correspondre aux cas 2 et 3 de gradient vertical des températures d'air [Heller, 1995] et [Andersen, 1998].

Pour les gradients verticaux au centre de l'atrium les profils sont plus ou moins de type linéaire correspondant au gradient vertical d'une stratification linéaire dans le cas où la chaleur est uniformément répartie et que le local est soumis à une ventilation par déplacement d'air [Heller, 1995] et [Andersen, 1998] et ceci peut être expliqué par la ventilation créée par l'ouverture des deux portes, dans la partie basse de l'atrium en créant ainsi une ventilation transversale (horizontale).

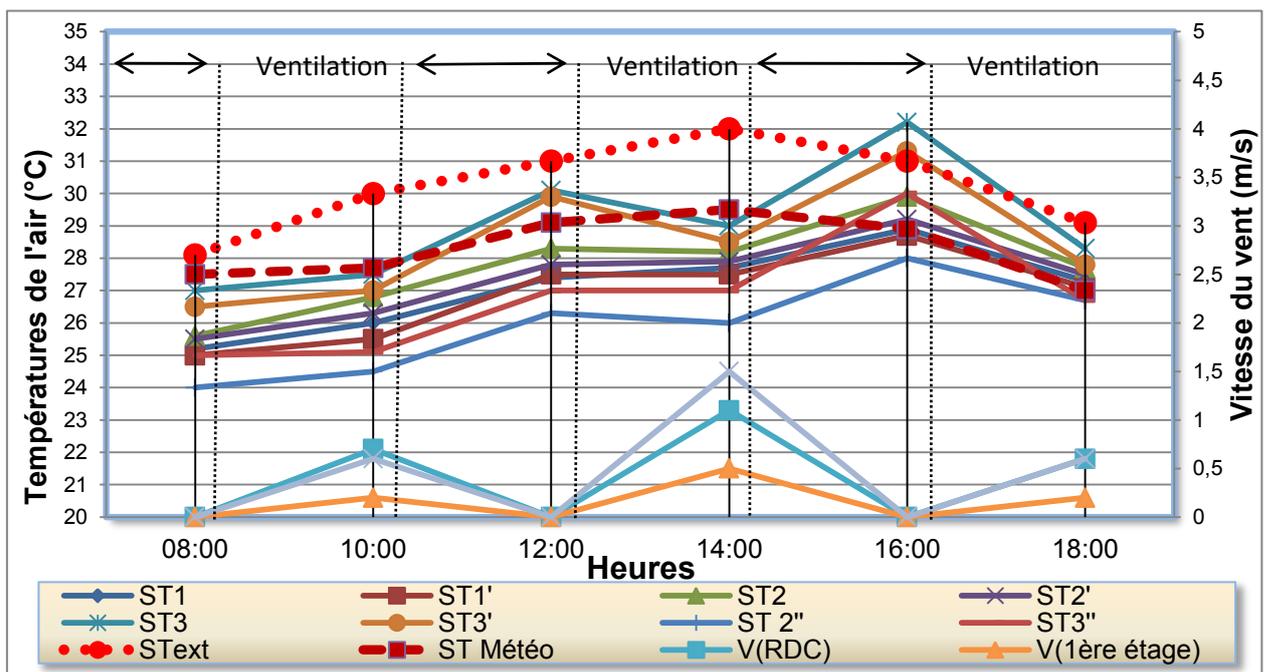
Cependant, les profils des gradients verticaux dans les coursives sont en majorité de type 2 qui correspond au gradient vertical d'une stratification où la source de chaleur se trouve en partie haute [Heller, 1995] et [Andersen, 1998]. La distribution de la température dans les coursives est en comparaison avec celle au centre de l'atrium peut être expliquée par le fait qu'au centre de l'atrium la ventilation naturelle est présente et l'écoulement de l'air est laminaire, alors que dans les coursives la ventilation s'estompe par les obstacles.

Cette distribution hétérogène peut causer une gêne pour les usagers empruntant les coursives, notamment celle du dernier étage. Du fait qu'il n'y a pas une évacuation de l'air chaud et il est cumulé au niveau haut de l'atrium provoquant ainsi une surchauffe, et un inconfort.

**IV.7.1.1.2. Les résultats de mesures pour le cas N°3 :**

Une autre investigation a eu lieu durant la période du 2 au 5 Août 2010, afin de vérifier l'effet de la ventilation naturelle sur le rafraîchissement de la température intérieure, à travers le cas N°3, un scénario où on a créé des mouvements d'air à l'intérieur de l'espace atrium par l'ouverture des fenêtres dans chaque niveau. Une ouverture des fenêtres pour le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> étage, et les deux portes au niveau du rez-de-chaussée. Cela est fait d'une façon alternative entre l'ouverture et la fermeture de ces derniers chaque 2heures. (Figure IV.24).

a. La température de l'air :



**Figure IV. 24 : résultat de la température de l'air de a journée du 5 Août 2010 (Cas N°3)**

[Source : auteur 2010]

Les résultats d'une journée type du mois d'Août prouvent que la ventilation naturelle peut être considérée comme stratégie de rafraîchissement passif des bâtiments à atrium Les

résultats présentés ci-dessus sont celles de la journée la plus significative du 5 Août 2010, qui est caractérisée par un ciel clair avec un vent faible de vitesse moyenne 2 m/s de direction Nord, et Nord-ouest, la température diurne varie entre 28,1 et 32°C, avec une amplitude de (3,9°C).

Les courbes des températures de l'air extérieur de la station météo et celles mesurées tracent les mêmes allures, avec un écart qui varie de 0,6 à 2,5 °C, justifié par l'impact du micro climat différent des deux stations.

Les profils des températures d'air enregistrées à l'intérieur dans les différentes stations sont semblables (Figure IV.24), et illustrent une corrélation de la progression des températures, avec la vitesse du vent intérieur dû au scénario de la ventilation transversale créée dans l'espace atrium. On remarque une hausse de la température de l'air intérieur en absence de renouvellement d'air par ventilation de (10 :15h à 12 :15h), et de (14 :15h à 16 :15), ceci correspond aux périodes de la fermeture des ouvertures. Par contre, une diminution de la température de l'air intérieur dans les différentes stations est constatée durant les périodes de (12 :15h à 14 :15h), et de (16 :15h à 18 :15h) de la ventilation transversale créée par l'ouverture des fenêtres et des portes dans les trois niveaux, sauf pour la période de (8 :15h à 10 :15h) où la température continue à augmenter malgré la présence de la ventilation, ceci est dû à l'impact de la température extérieure où on peut la décrire comme une augmentation légère en comparaison avec la progression de la température extérieur durant cette période.

La station ST3 située au 2<sup>ème</sup> étage sous la coupole vitrée marque les valeurs les plus élevées des températures de l'air intérieur, avec un maximum de 32,2°C à 16 :00h, en absence d'une ventilation intérieure dépassant ainsi la température de l'air extérieur.

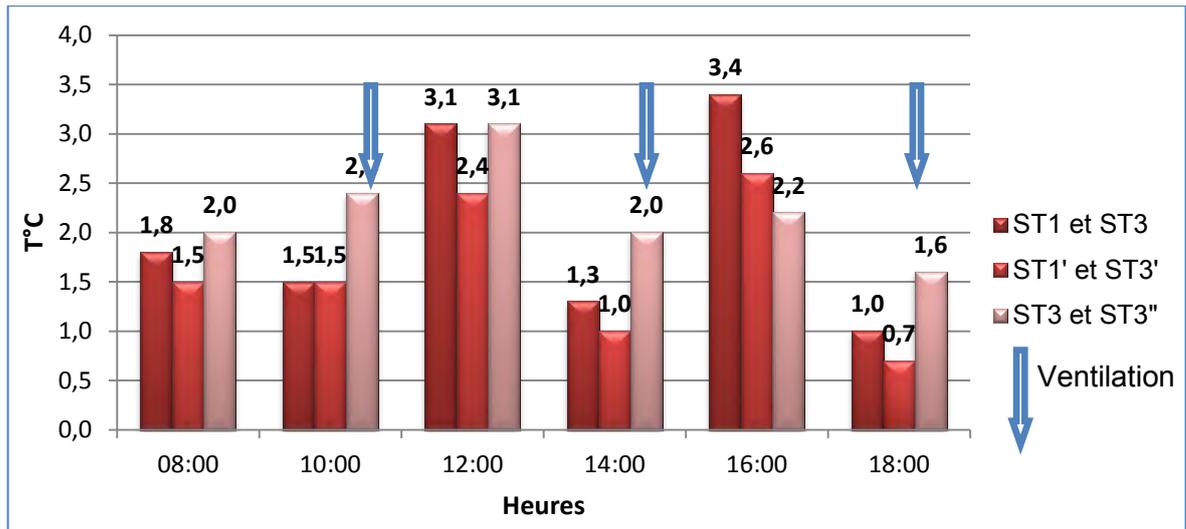


Figure IV. 25 : évolution de l'écart de la température d'air (Cas N°3)

[Source : auteur 2010]

Les écarts des températures de l'air intérieur entre le niveau bas et haut augmentent avec la hausse de la température et diminuent avec la baisse de celle-ci. D'une part, on constate que ces écarts sont moins importants, avec la présence d'une ventilation transversale qui diminue la température de l'air intérieur en rafraichissant l'ambiance thermique interne de l'espace atrium, avec un minimum de 0,7°C enregistré dans les coursives à 18 :00h. (Figure IV.25)

D'autre part, ces écarts sont plus importants durant les périodes de l'absence totale d'un renouvellement d'air par ventilation, donc l'air chaud est piégé à l'intérieur de l'espace atrium au niveau haut sous le vitrage, et qui accentue l'écart des températures par niveau, et par transfert thermique, les températures de l'air dans les coursives ainsi celles des espaces adjacents sont affectés. L'écart de la température de l'air maximum est de 3,4°C enregistré dans l'espace atrium à 16 :00h.

b. L'humidité relative de l'air :

Les taux d'humidité mesurés le 5 Août 2010 sont illustrés dans la (Figure IV.26), l'humidité extérieure mesurée représente une moyenne diurne de 65%, une valeur logique par rapport au climat humide de la wilaya de Jijel.

D'une vue générale des courbes des humidités relatives enregistrées à l'intérieur tracent les mêmes allures et qui sont en corrélation bien déterminée avec le scénario de la ventilation créée à l'intérieur de l'espace atrium. Elles enregistrent des valeurs au-dessous

de celles de l'extérieur, les taux les plus élevés sont enregistrés au niveau des rez-de-chaussée dans les stations ST1 et ST1", avec un maximum de 65,8% à 8 :00h. Et un minimum de 47 ,5% enregistré dans la station ST3 à 16 :00h.

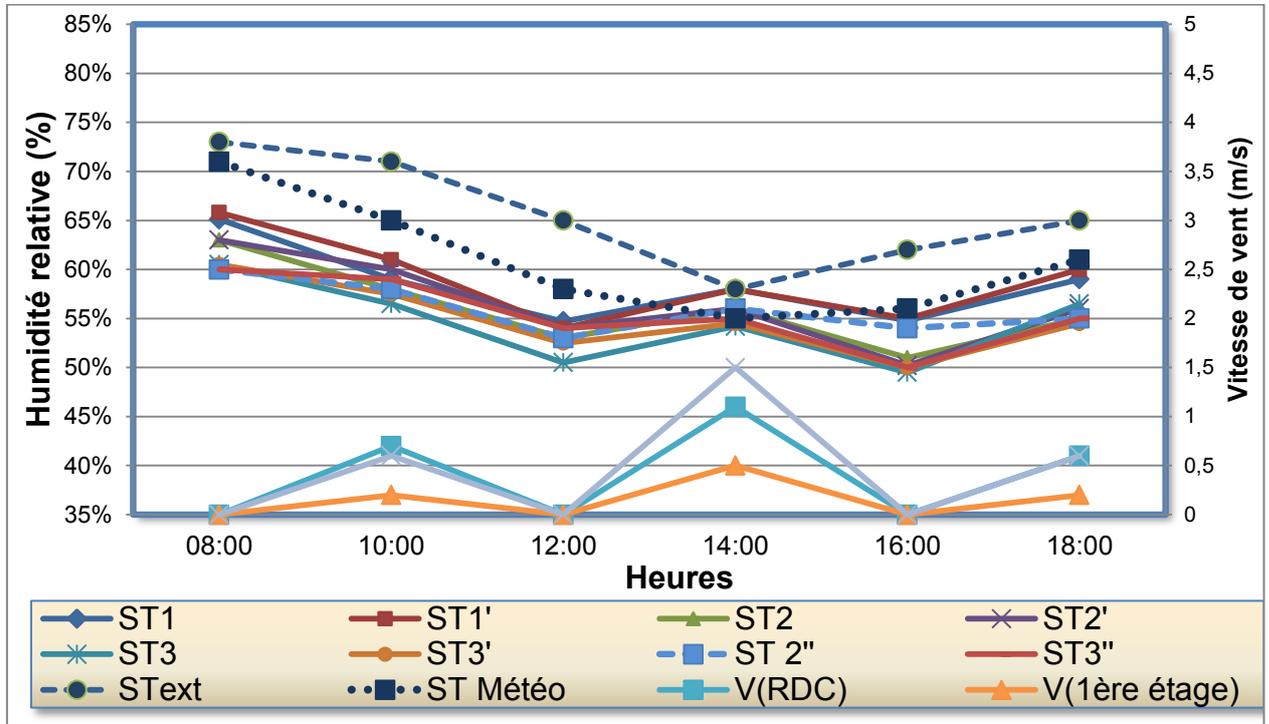


Figure IV. 26 : variation de l'humidité relative de l'air de la journée du 19 août 2010 (Cas N°3)

[Source : auteur 2010]

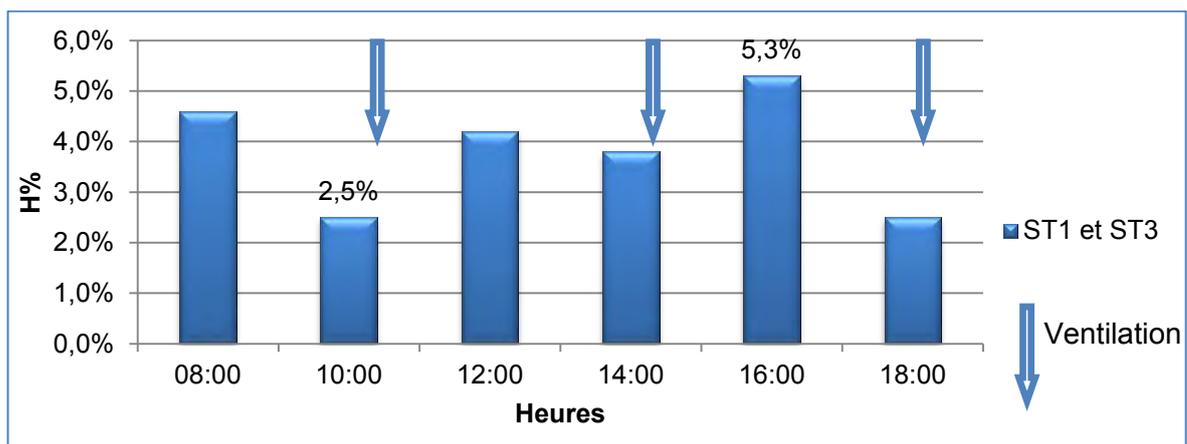


Figure IV. 27: évolution de l'écart d'humidité relative entre les stations ST1 et ST3 (Cas N°3)

[Source : auteur 2010]

Les écarts des humidités entre le niveau inférieur et le niveau supérieur dans l'espace atrium marque des variations faibles de 2,5 à 5,3%, les variations durant la période de ventilation sont moins prononcées que celles des périodes sans ventilation. (Figure IV.27)

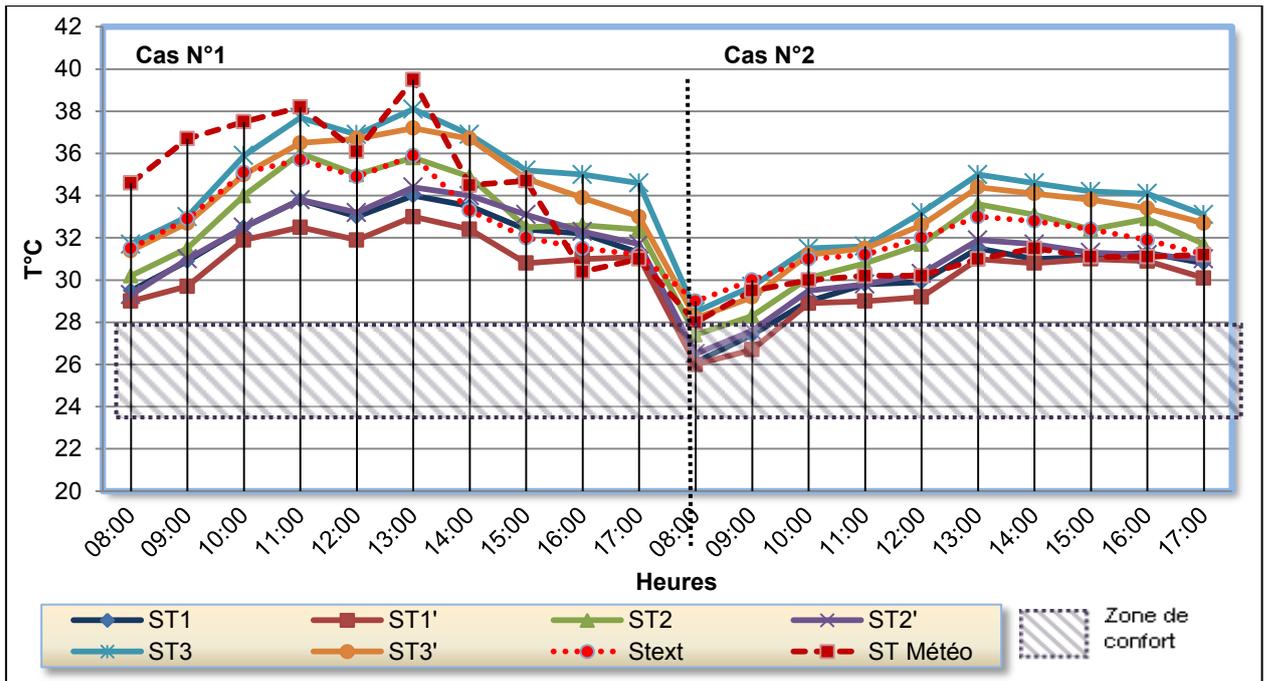
Ces variations des humidités relatives de l'air intérieur sont bien logiques, vu l'influence de la variation des températures de l'air intérieur, des humidités relatives extérieure, et l'impact de renouvellement d'air par ventilation naturelle intérieure.

#### **IV.7.1.1.3. Evaluation du confort thermique intérieur :**

##### **a. Comparaison des températures par rapport aux plages de confort :**

La plage de confort de la (Figure IV.32) est définie par la formule de Humphrey ( $T_c = 11,9 + 0,534T_o$ ) pour le mois d'août. La température moyenne de ce mois étant de 26,4 °C, la température neutre calculée est de 26,0°C, et la limite supérieure et inférieure de confort sont de 28°C et 24°C respectivement (voir annexe B).

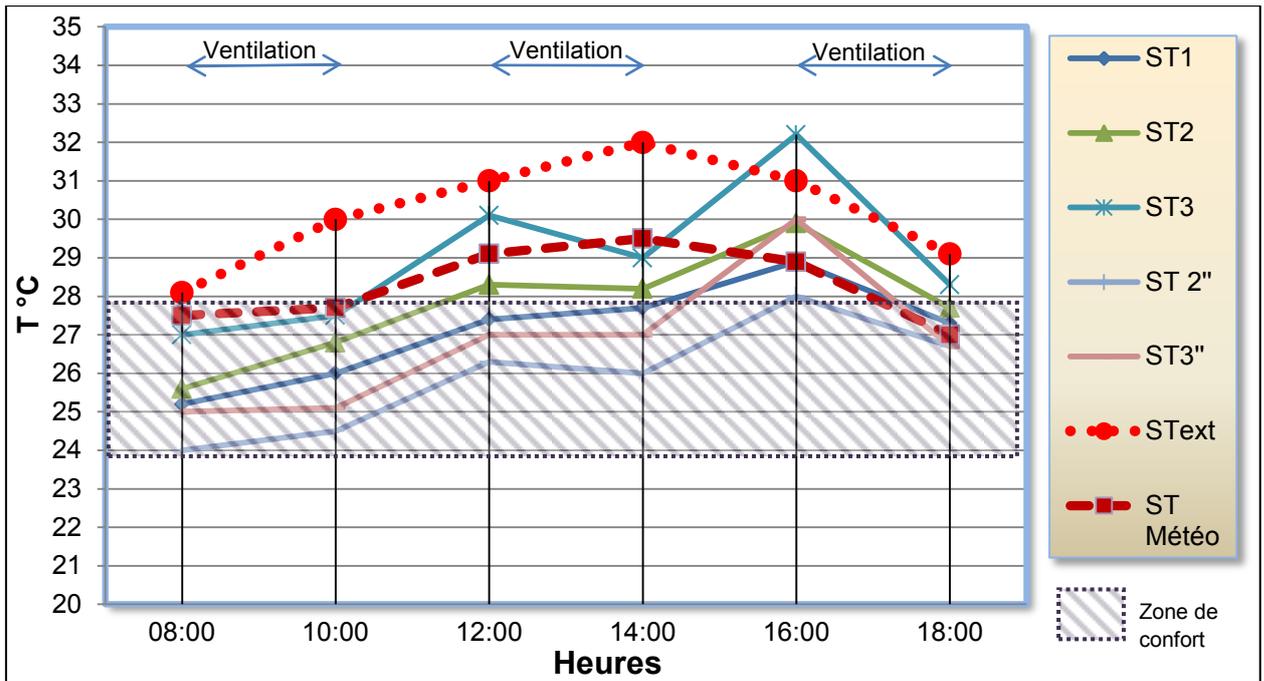
Les températures de l'air intérieur enregistrées dans les deux cas sont liées à la température de l'air extérieur. Elles gardent des valeurs plus élevées par rapport à la limite supérieure de confort (limite de Humphrey) et ce n'est qu'à partir de (8 :00h à 9 :00h) seulement dans le cas N°2 que les températures intérieures dans le niveau inférieur et intermédiaire enregistrent des valeurs au-dessus de la limite supérieure de confort. (Figure IV.28), ces grands écarts marqués entre les températures intérieures et la limite supérieure de la zone de confort enregistrent une valeur maximale de 10°C à 13 :00h dans le cas N°1, cela exprime une situation d'inconfort ressentie à l'intérieur de l'espace dû à la surchauffe causée par la toiture vitrée. Pour le cas N°2, la ventilation naturelle conçue à l'intérieur de l'espace atrium, limitée au niveau inférieur, adoucit légèrement les températures interne et par suite diminue les écarts avec la zone de confort, mais cela ne permet pas d'atteindre la zone de confort, et l'inconfort dans l'espace est toujours ressenti.



**Figure IV. 28 : Comparaison des températures de l'air interne (Cas N°1 & 2) avec les limites de confort pour le mois d'Août (Humphrey)**

[Source : auteur 2010]

La ventilation naturelle peut être considérée comme une stratégie bioclimatique importante pour contrôler la température et améliorer le confort interne [AYOOB, 1994]. Ce qui est clairement démontré dans cette étude pour le Cas N°3. En effet, durant les périodes où l'espace est soumis à une ventilation naturelle dans les différents niveaux, on a enregistré des valeurs de température interne qui se rapprochent de la limite supérieure de confort (Figure IV.29), avec un écart de 1°C à 14 :00h durant cette période de ventilation entre la station ST3 et la limite supérieure de confort. En absence totale de la ventilation, Cet écart va augmenter à 4,2 °C enregistré à 16 :00h. Donc avec la ventilation naturelle on a pu baisser la température de 3°C, et c'est un exploit passif important.



**Figure IV. 29 : Comparaison des températures de l’air interne (Cas N°3) avec les limites de confort pour le mois d’Août (Humphrey)**

[Source : auteur 2010]

**b. Représentation des résultats sur le diagramme de St Szockolay :**

La représentation des températures et des humidités relatives horaires des différentes zones intérieures a été faite par le calcul des moyennes des différentes stations pour chaque espace. La zone de confort du mois d’Août est reportée sur le diagramme psychométrique. Sachant que, la moyenne mensuelle de la température de l’air du mois d’Août est de 26,4°C, la température neutre est de 25,8°C selon la formule d’Auliciems ( $T_n=17,6+0,31 T_o$ ) (voir Annexe B).

Les figures IV.30-31-32 confirment que l’humidité et la température de l’air intérieur changent en fonction des données climatiques mais aussi avec la ventilation.

- Pour le premier cas (Figure IV.30), les valeurs élevées des températures et des taux des humidités relatives enregistrés dans les deux espaces atrium et coursives ont mené à ce que la majorité des points se situent en dehors de la zone de confort pour le mois d’Août. ceci prouve de surchauffe est amplifié par l’effet de serre dû au vitrage de la coupole, en absence total d’un renouvellement d’air pour l’espace atrium.

- Pour le deuxième cas (Figure IV.31), on remarque que les points se situent aussi en dehors de la zone de confort pour le mois concerné, avec un grand besoin et demande d'une ventilation naturelle. La ventilation transversale créée au niveau inférieur adoucit l'égèrement les températures d'air mais elles restent toujours loin d'assurer une sensation de confort interne.
- Pour le troisième, et le dernier cas (Figure IV.32), lorsque la surchauffe au niveau supérieur cause de l'inconfort est dissipée par le renouvellement d'air dû à la ventilation naturelle présente dans les différents niveaux, la majorité des points sont dans la zone de confort du mois d'Août, les quelque points restant se rapprochent à la zone de confort. Ce qui aurait pu être atteint avec une ventilation par tirage thermique en réalisant des ouvertures au niveau de la coupole pour que le renouvellement d'air englobe tout le volume d'air de l'espace atrium.

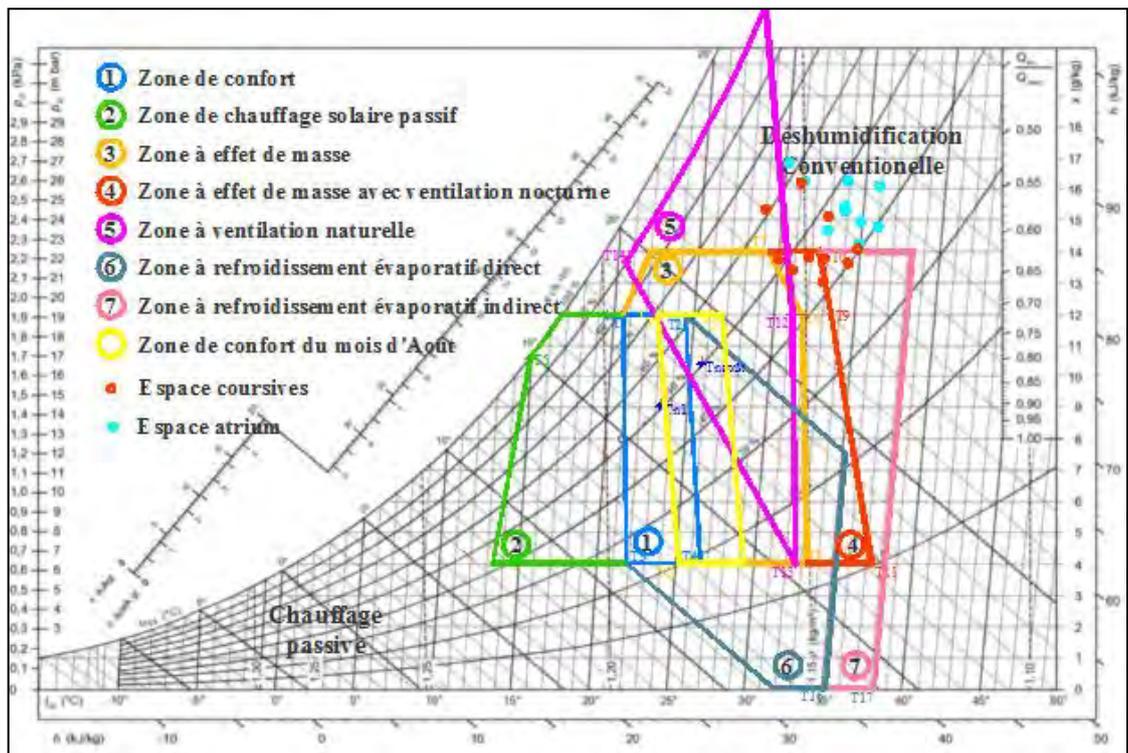


Figure IV. 30 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°1)

[Source : auteur 2010]

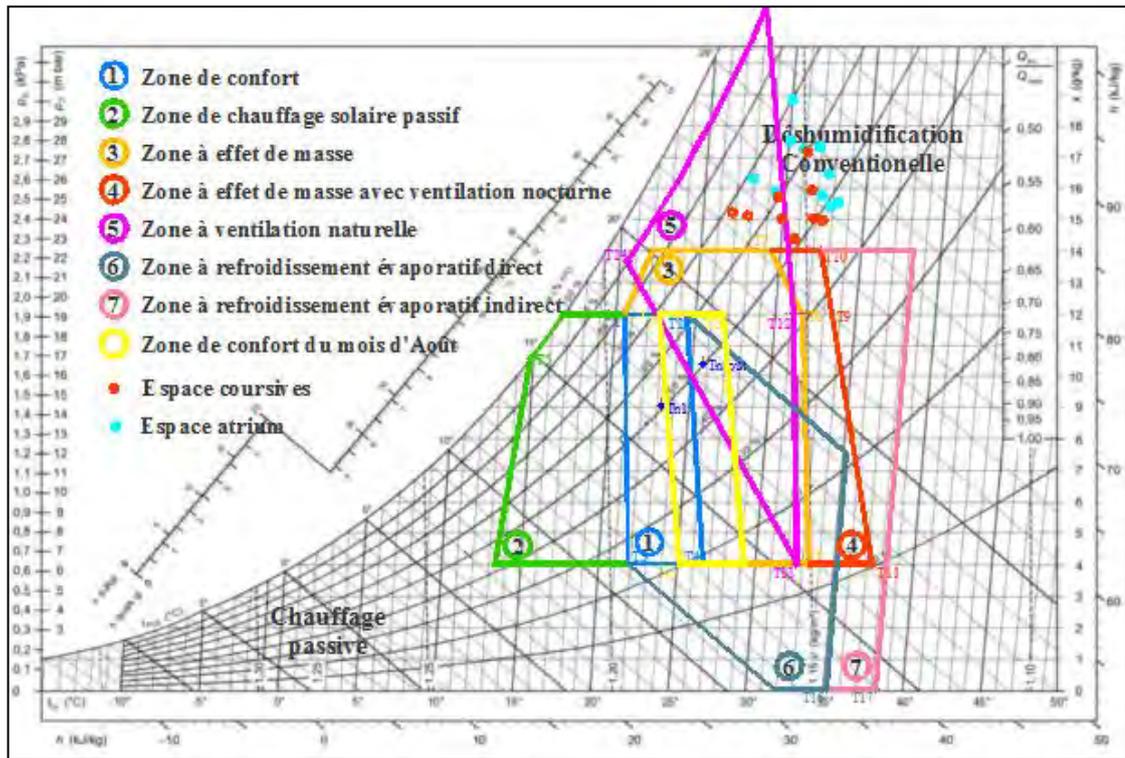


Figure IV. 31 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°2)

[Source : auteur 2010]

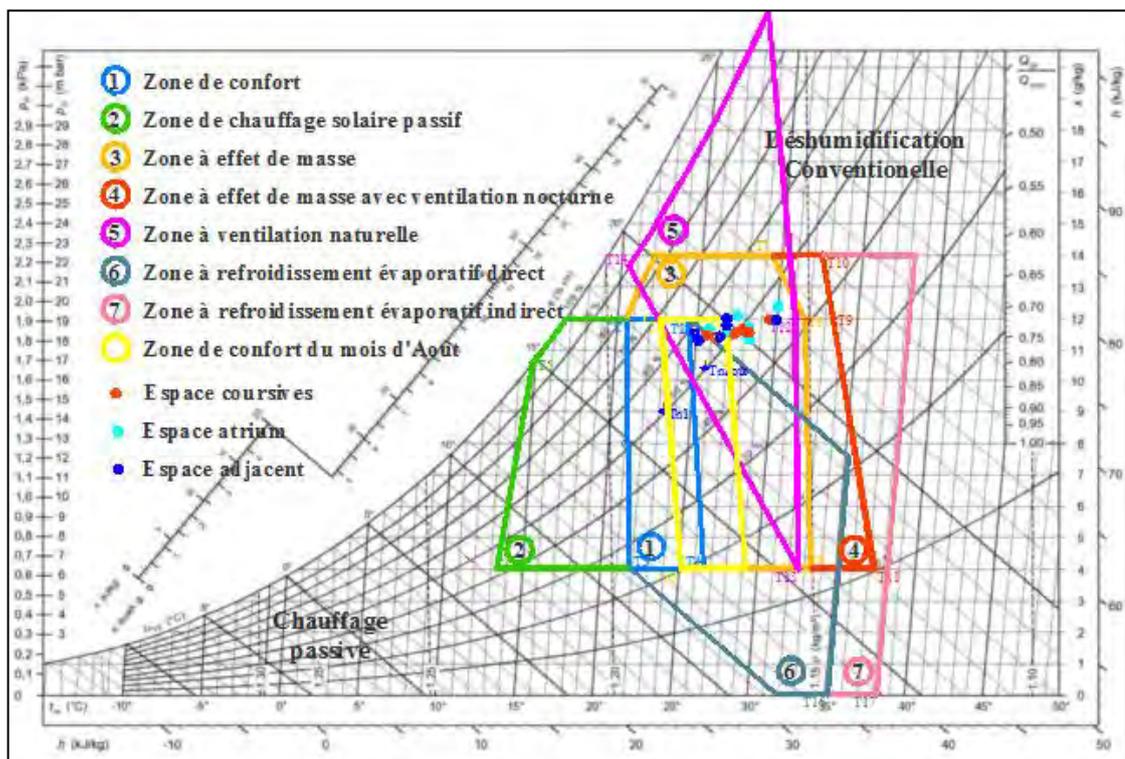


Figure IV. 32 : représentation des températures d'air moyennes internes (Cas N°3)

[Source : auteur 2010]

IV.7.1.1.4. effet de la ventilation sur la stratification thermique :

Nous nous intéressons ici uniquement au champ des températures. D'une part les températures d'air enregistrées dans le vide à différentes hauteurs sont comparées afin de mettre en évidence l'effet du renouvellement d'air sur la stratification. D'autre part, les températures dans les coursives sont comparées à celles enregistrées dans l'espace central afin de montrer ses effets sur la distribution des températures.

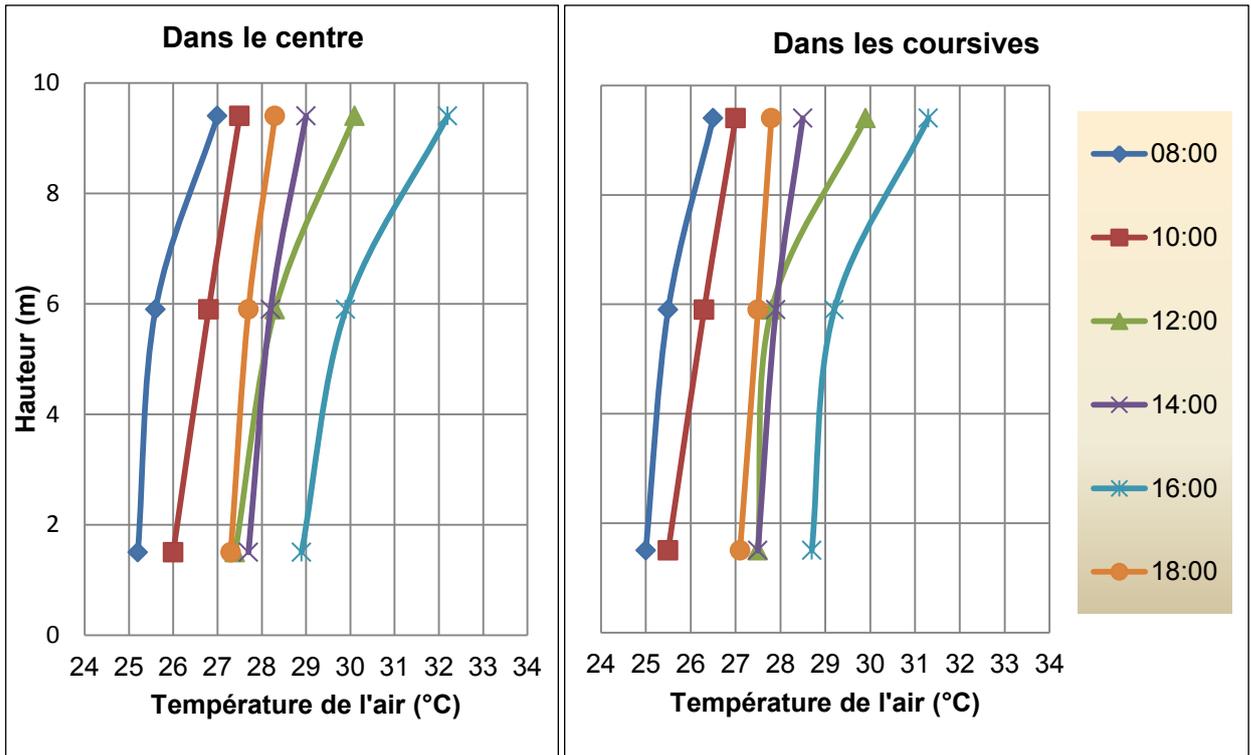


Figure IV. 33: les gradients thermiques verticaux des températures d'air (Cas N°3)

[Source : auteur 2009]

Les résultats donnés à travers les gradients thermiques verticaux des températures d'air intérieur enregistrées dans les différentes stations (Figure IV.33), constitue une analyse comparative entre deux cas différents, et qui permet de donner une idée sur le champ des températures intérieures en l'absence de renouvellement d'air, une présence d'une stratification thermique est bien illustrée, par une hausse de la température de l'air en fonction de la hauteur, du niveau bas vers le niveau supérieur. Cependant, cette stratification est accentuée à 12 :00h, et à 16 :00h avec un écart de 3,3°C enregistré dans l'espace atrium, une période où l'atrium reçoit le maximum des gains solaires à travers la coupole vitrée, l'air chaud est donc piégé sous le toit au niveau supérieur, avec une

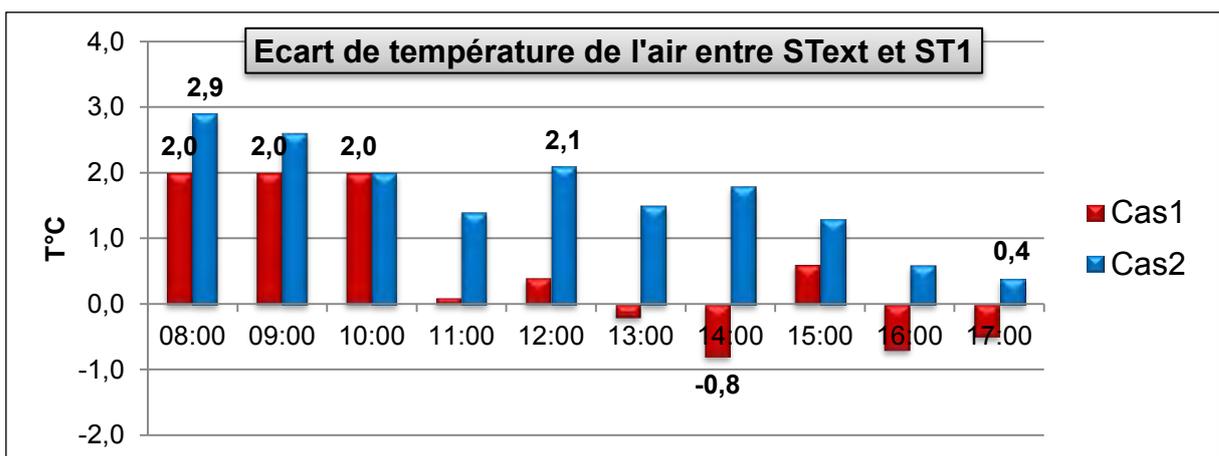
absence totale d'un renouvellement d'air intérieur durant ces périodes. L'absence de prises d'air et le flux solaire appliqué explique cette hausse des températures. Par contre, des amplitudes qui ne dépassent pas 1,5°C enregistrées aux périodes de 10 :00h, 14 :00h, et 18 :00h. et qui coïncident avec les périodes de la ventilation transversale interne, qui favorise un renouvellement d'air de tout le volume de l'espace atrium. Atténuant ainsi la surchauffe, et la différence thermique entre les différents niveaux.

**IV.7.1.1.5.Effet de la ventilation sur le rafraîchissement intérieur :**

La ventilation a un effet très important sur la dissipation de la chaleur dans les bâtiments. Elle fait partie des recommandations ressorties par l'analyse bioclimatique (tables de Mahoney, et diagramme psychrométrique de Szokolay) de la ville de Jijel. (Voir annexe B).

La ventilation naturelle est connue pour être une technique plus appréciée par rapport aux autres méthodes de rafraîchissement, C'est une stratégie passive adoptée pendant la saison estivale pour réduire les gains thermiques et en même temps abaisser les températures internes de sorte qu'elles s'égalisent avec les températures extérieures.

Pour analyser l'impact de la ventilation naturelle sur l'ambiance thermique interne de l'espace atrium, une comparaison des résultats des ambiances thermiques des deux scénarios, celle du Cas sans ventilation, et celle d'une ventilation transversale créée au niveau inferieur.il s'agit des Cas N° 1 et 2.

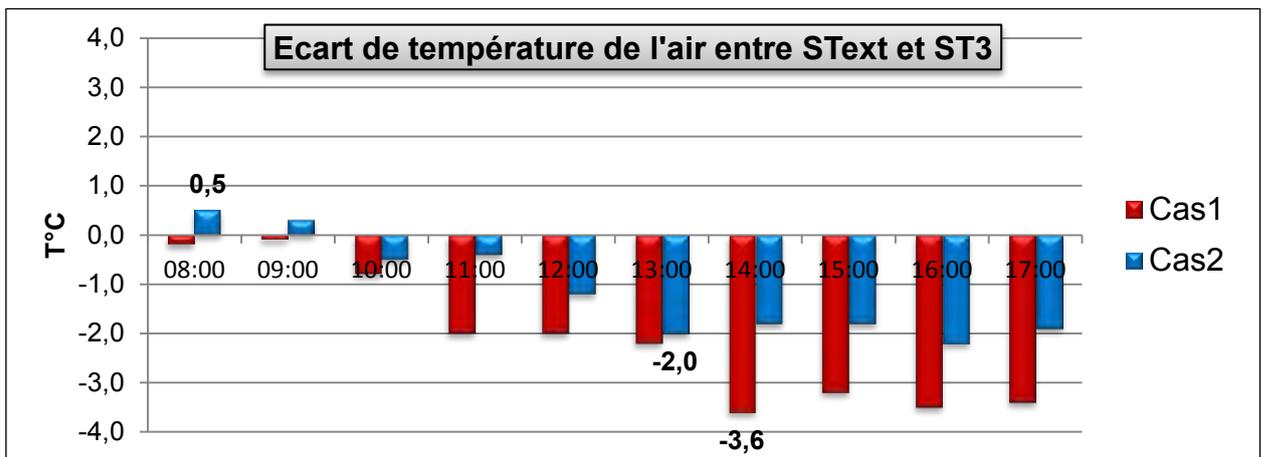


**Figure IV. 34 : évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST1 dans les deux Cas N°1, et Cas N°2**

[Source : auteur 2010]

Les températures de l'air intérieur au niveau du rez-de-chaussée dans le cas N°2 sont maintenues au-dessous de celle de l'extérieur durant toute la journée (Figure IV.34). Cependant, dans le cas de la journée sans ventilation, des valeurs négatives des écarts sont enregistrées exprimant ainsi une surchauffe de l'ambiance interne de l'espace atrium ; où les températures de l'air dépassent celles de l'extérieur.

Un effet de rafraîchissement des températures par renouvellement d'air dû à la ventilation transversale est bien mis en évidence.

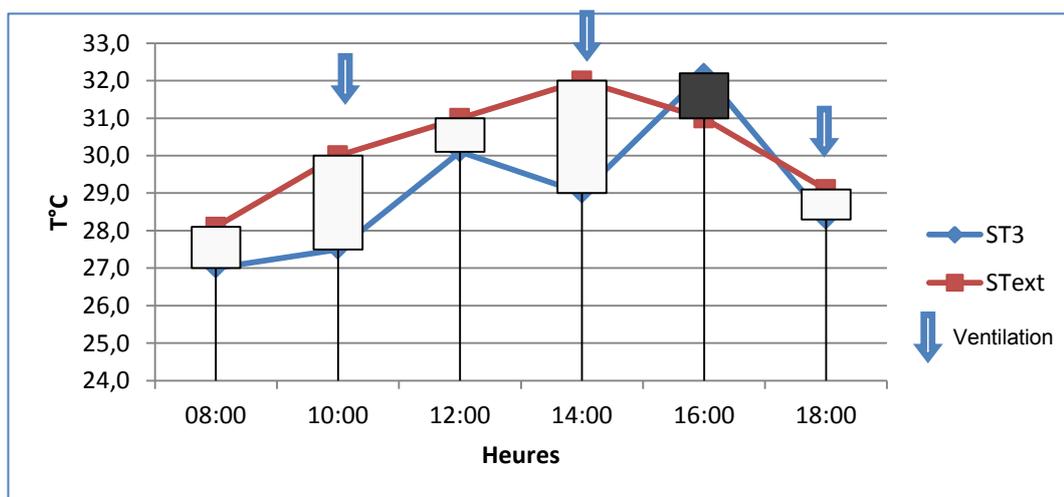


**Figure IV. 35 : évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST3 dans les deux Cas N°1, et Cas N°2**

[Source : auteur 2010]

Les écarts des températures dans les deux cas ont des valeurs négatives (Figure IV.35), des températures internes dépassent l'extérieur, cette surchauffe est très accentuée dans le Cas N°1 sans ventilation, mais elle reste aussi considérable pour le deuxième cas de la ventilation transversale, même si les écarts sont moins que ceux du cas N°1. Cette ventilation transversale qui se situe au niveau bas, ces effets rafraîchissant agissent d'une façon horizontale et se limite au même niveau, les échanges des flux d'air n'atteint pas le niveau supérieur pour qu'elle puisse chasser l'air chaud situé sous le toit vitré. Donc un système de ventilation naturelle transversale à chaque niveau, ou verticale par tirage thermique est nécessaire pour mettre en mouvement les flux d'air de toute l'ambiance interne pour un renouvellement d'air continu, parce que la défaillance des ambiances thermiques internes dans les espaces atrium réside au niveau supérieur, où l'air chaud tend à stagner en augmentant les températures de l'air de l'espace ainsi que ces espaces adjacents. Et par suite, un inconfort thermique est ressenti.

Dans cet axe-là, le Cas N°3 est réalisé avec un renouvellement d'air par ventilation naturelle transversale dans tous les niveaux de l'espace atrium, pour prédire un rafraîchissement thermique de l'ambiance interne, d'après les résultats obtenus (Figure IV.36), une diminution des températures intérieures amplifie l'écart avec l'extérieur durant les périodes de ventilation. Cet écart diminue par un accroissement de la température interne en absence de la ventilation, qui dépasse la température extérieure à 16 :00h. De cela l'amélioration des ambiances thermiques de l'espace atrium signifie une amélioration des ambiances internes des espaces adjacents.



**Figure IV. 36: évolution de l'écart de la température d'air entre la SText et ST3 (Cas N°3)**

[Source : auteur 2010]

La ventilation transversale aux différents niveaux, renforce les mouvements des flux d'air par renouvellement de celui-ci, qui permet l'évacuation de l'air chaud accumulé au niveau supérieur, résultant ainsi un rafraîchissement des températures de l'air.

#### **IV.7.1.1.6. L'impact thermique de l'atrium sur les espaces adjacents :**

La température dans un espace largement vitré et inconditionné dépend des montants relatifs des gains solaires, et des pertes par transmission. Quant au transfert de chaleur entre ces espaces et les locaux adjacents, ils dépendent de leurs températures respectives. Cependant, il est assez délicat de prédire la température dans les espaces adjacents. Elle est relative à plusieurs paramètres tels que le volume de la pièce, la performance du mur de séparation, et les gains internes.

Les espaces atrioms dans les bâtiments, de par leurs grands volumes, qui constitue en lui-même une ambiance avec ses propres paramètres thermiques, peut être considéré comme un environnement extérieur pour les espaces adjacents.

Une comparaison entre l'évolution des températures de l'air des deux espaces (atrium, espaces adjacents), au niveau supérieur où se localise l'état ultime des ambiances thermiques internes, est illustrée dans la (Figure IV.37).

Une évolution identique des températures de l'air est constatée entre les courbes des deux stations ST3, et ST3". Durant la période de surchauffe de l'espace atrium à 16 :00h la température de l'air dans l'espace adjacent tend à augmenter malgré que, la température de l'extérieur est descendante, Et un rafraichissement dans l'espace adjacent coïncide avec le rafraichissement de l'espace atrium. Cela révèle le degré d'influence de l'atrium exercé sur l'ambiance de l'espace adjacent.

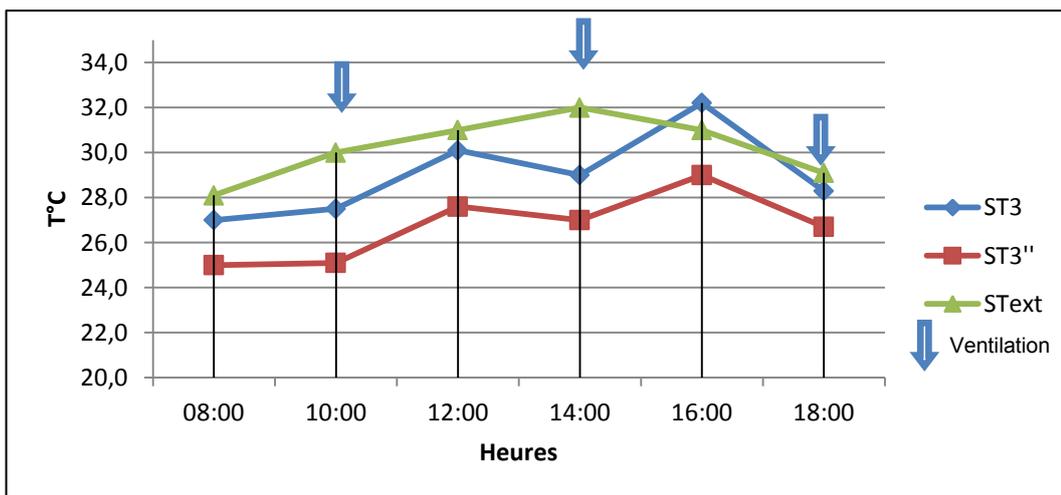


Figure IV. 37 : variation de la température de l'air au niveau supérieur (Cas N°3)

[Source : auteur 2010]

De cela l'amélioration des ambiances thermiques de l'espace atrium signifie une amélioration des ambiances internes des espaces adjacents.

#### IV.7.1.2. Conclusion de l'investigation estivale:

Cette partie d'investigation consacrée à la saison estivale nous a permis :

- ✓ D'étudier le comportement d'un atrium construit en utilisant la mesure afin d'analyser, durant cette période, ce qui s'y passe réellement du point de vue thermique.
- ✓ De démontrer l'effet de la ventilation naturelle comme une stratégie bioclimatique du contrôle de l'ambiance interne et l'amélioration du confort dans les espaces atrium.

Concernant le premier point, les mesures effectuées dans le cadre de l'atrium de la maison de la culture de Jijel montrent que les problèmes thermiques sont présents en été. Ces problèmes, comme nous avons pu le voir, sont essentiellement des phénomènes de surchauffes localisées que la géométrie et la conception de l'atrium accentuent.

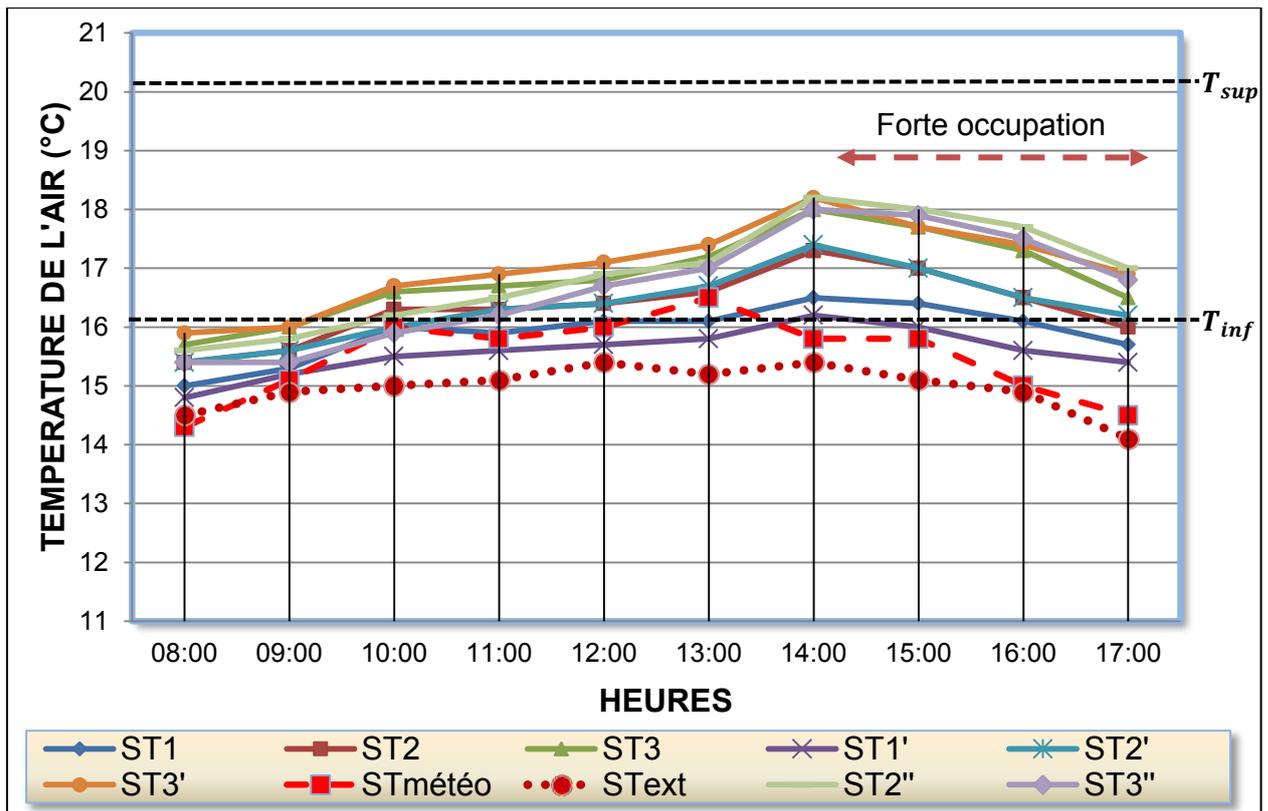
La ventilation naturelle étudiée dépend de la conception de bâtiment, ou cette conception ne prend pas en considération des dispositifs pour une ventilation naturelle, donc les scénarios qu'on a étudié se limitent à la création d'un renouvellement d'air par ventilation transversale à travers les ouvertures. Les résultats obtenus montrent l'effet rafraîchissant de cette stratégie sollicitée pour lutter contre la surchauffe d'été dans les atriums et améliorer l'ambiance thermique de ces espaces.

#### **IV.7.2. Saison hivernale : (hiver 2010)**

Dans le but d'évaluer le comportement thermique de l'espace atrium pendant la saison hivernale, une investigation a été envisagée durant 4 jours successives du mois de février 07, 08, 09, et le 10, avec deux cas différents, l'une d'une journée ensoleillée (09/02/2010), et l'autre à ciel couvert sans soleil, il s'agit des jours du 07, 08, et 10 Février.

##### **IV.7.2.1. Cas d'une journée sans soleil (Cas N°4):**

Les résultats analysés sont ceux de la journée la plus représentative de ce cas, (07/02/2010), caractérisée par un vent faible de vitesse moyenne 4,1 m/s de direction Ouest, Nord-est, et un ciel totalement couvert, la température diurne varie de 10,2°C à 16,5 °C.



**Figure IV. 38: l'évolution de la température de l'air de la journée de 7 Février 2010 (Cas N°4)**

[Source : auteur 2010]

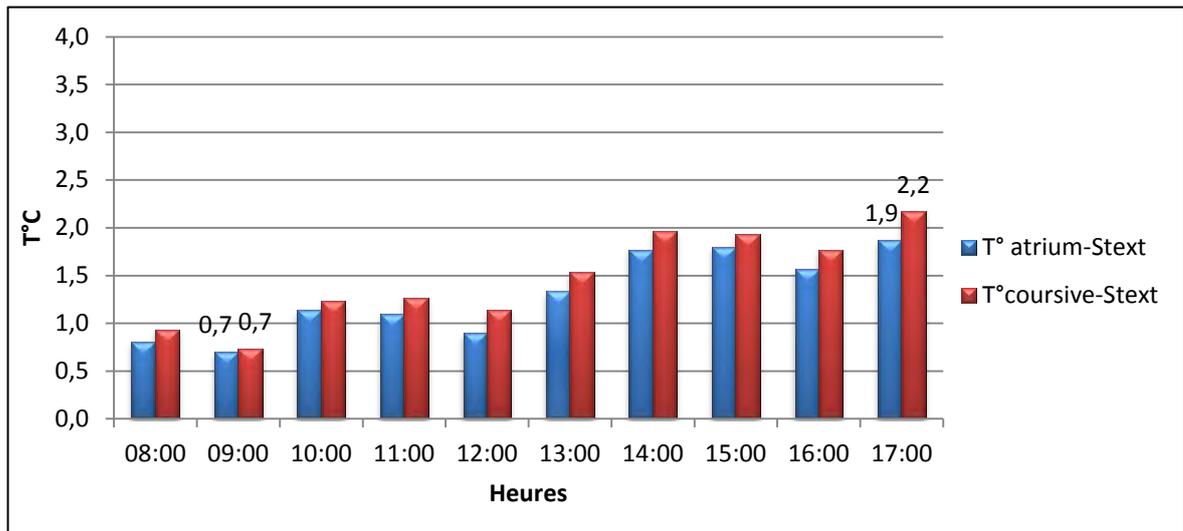
L'évolution des températures d'air enregistrées dans les différentes stations de mesures trace les mêmes allures, avec des amplitudes variant de 0,5 à 2°C. (Figure VI.38)

Les températures enregistrées à l'intérieur sont généralement au-dessus de la température extérieure soit mesurée ou celle de la station météo. Avec des pics qui varient de 16,2 (ST1") et 18,2 (ST3") à 14:00h, le pic pour l'extérieur est enregistré une heure avant, à 13:00h.

Une hausse des températures de l'air intérieur est remarquée à partir de 14 :00h la température des espaces adjacents dépasse la température dans les coursives, ces deux espaces représentent la salle de lecture, et la salle d'internet, ceci coïncide avec la période d'occupation de ces espaces, où le nombre d'occupant croît au fur et à mesure.

En effet, cette augmentation provoque une élévation de la température de l'air dans ces espaces. Donc le taux d'occupation a un rôle non négligeable dans l'établissement du confort intérieur.

À partir de 9 :00h les températures d'air enregistrées dans les différentes stations de mesure sauf pour la station ST1<sup>o</sup>, peuvent être classées comme des températures confortables puisque leurs valeurs dépassent la température inférieure de la zone de confort pour le mois de Février d'une valeur de 16,1°C. (Voir annexe B). Notant que les valeurs des températures d'air récoltées au niveau de la station météo, et celles mesurées sur le lieu avoisinent aussi la limite inférieure de la zone de confort.



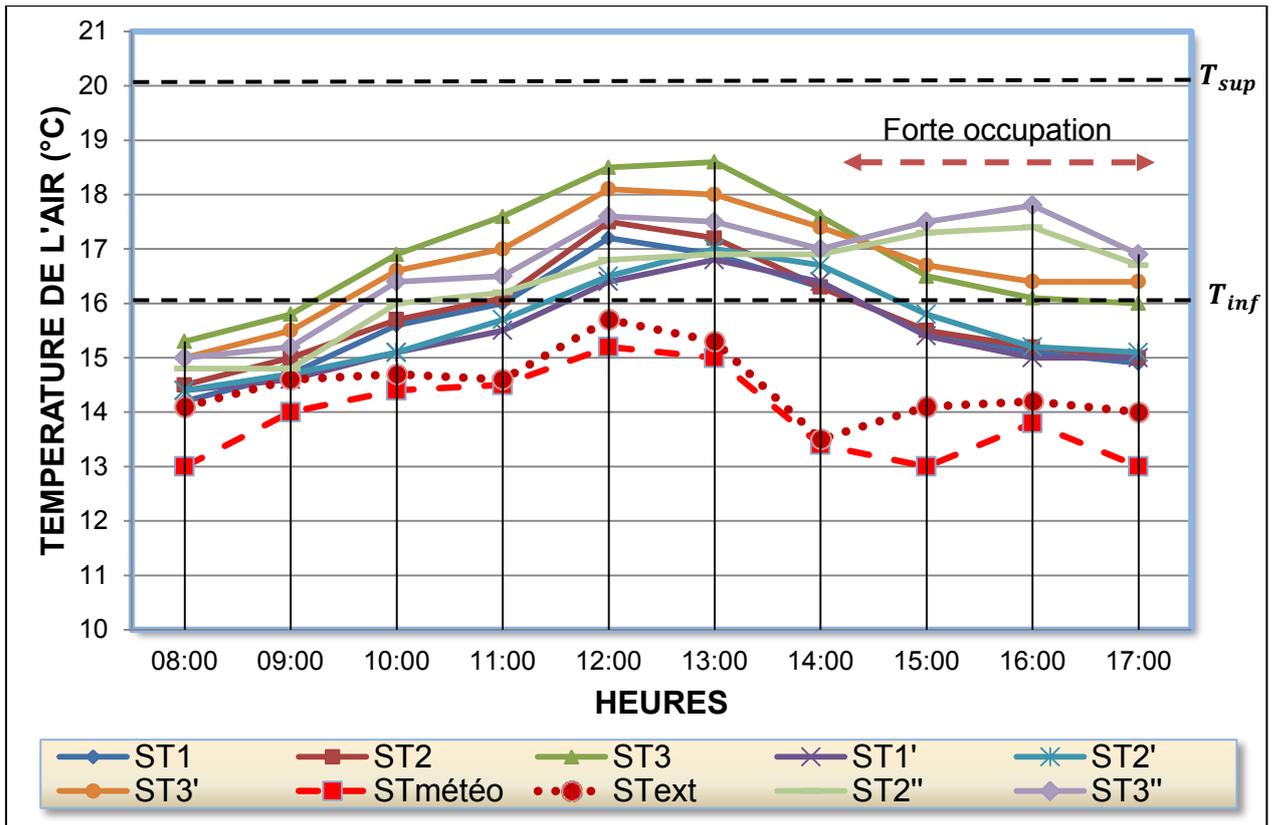
**Figure IV. 39 : évolution des écarts des températures de l'air**

[Source : auteur 2010]

Les écarts entre les températures internes et externes varient entre 0,7°C à 2,2°C, de faibles écarts dus aux baisses des températures de l'air enregistré à l'intérieur, cela résulte d'une part, de l'influence des conditions externes et les pertes par transmission accentuées à travers la surface de la coupole vitrée que, Et d'autre part, du fait que les gains internes dans le bâtiments, qui se limitent aux gains sensible d'éclairage artificiel, des appareils utilisés, et les gains d'occupants.

#### **IV.7.2.2. Cas d'une journée ensoleillée (Cas N°5):**

La journée du 09/02/2010 est caractérisée par un vent faible de vitesse moyenne 4,1 m/s de direction Nord-est et un ciel clair, et un écart diurne de la température de 2,2°C.



**Figure IV. 40 :l'évolution de la température de l'air de la journée de 9 Février 2010 (Cas N°5)**

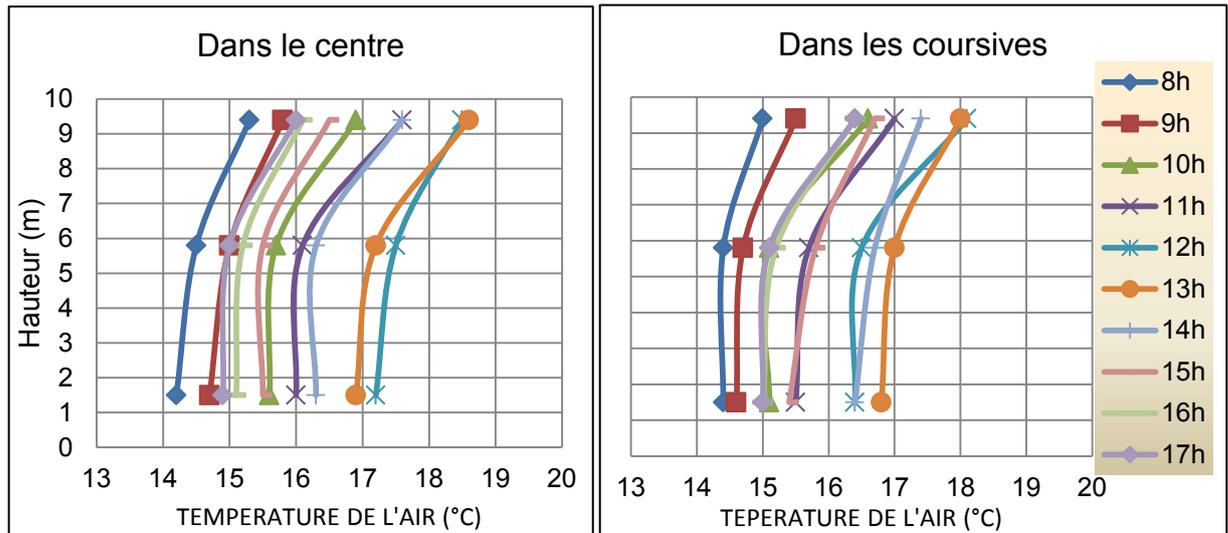
[Source : auteur 2010]

Les profils des températures de l'air enregistrées à l'intérieur dans les différentes stations de mesure tracent les mêmes allures, avec celles des températures enregistrées à l'extérieur, soit de mesure ou de la station météo (Figure IV.40), mais avec des valeurs plus élevées de cette dernière, suivant ainsi le parcours d'évolution des gains solaires durant la journée, où les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans l'espace atrium de 12 :00h à 14 :00h, la période où l'espace reçoit le maximum des radiations solaires à travers la coupole vitrée. Cette surface vitrée de la toiture induit le phénomène de l'effet de serre ce qui incite l'augmentation des températures de l'air intérieur. Cette augmentation permet de garder des températures d'air intérieur au-dessus de la température limite inférieure de la zone de confort du mois de Février.

La dégradation des valeurs des températures de l'air dans les différentes stations, est en corrélation avec les niveaux des stations, où ces valeurs diminuent toutes en descendant vers le niveau bas. En fonction de la quantité des gains solaires reçus dans chaque niveau.

À partir de 14 :00h, on remarque une hausse des températures dans les stations ST2<sup>me</sup>, et ST3<sup>me</sup>, les stations des espaces adjacents dépassant ainsi les températures de l'air dans l'espace atrium avec un pic de 17,5°C dans la station ST3<sup>me</sup>, cette hausse est due à l'occupation intense de ces deux espaces à partir de 14 :00h.

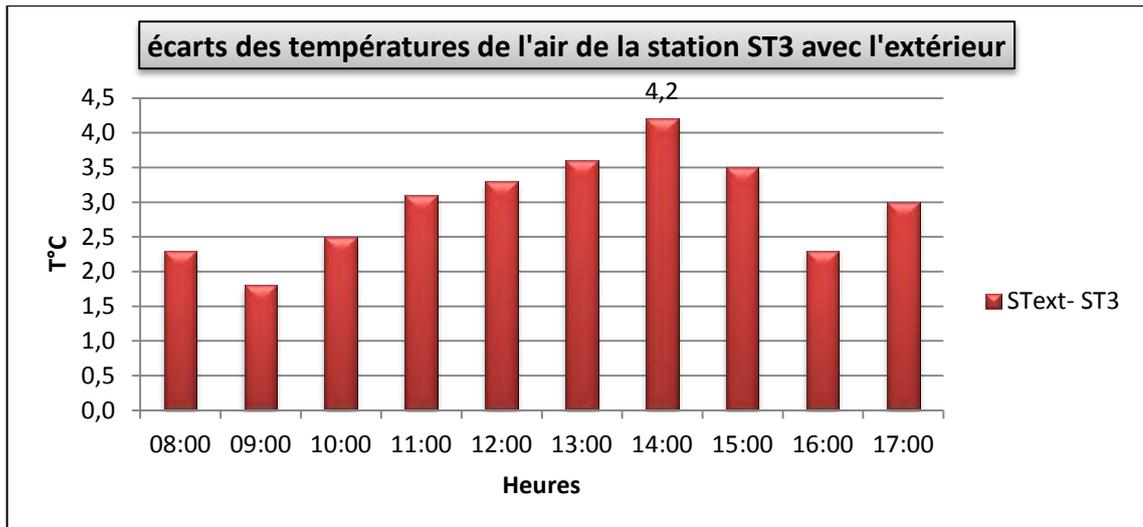
Une analyse de l'évolution des températures de l'air en hauteur est faite pour mettre en évidence, la variation des températures de l'air entre le niveau bas, et le niveau supérieur.



**Figure IV. 41 : les gradients thermiques verticaux des températures d'air (Cas journée ensoleillée)**

[Source : auteur 2010]

L'écart de température entre le point le plus haut et le point le plus bas atteint le 1,7°C à 13 :00h, révèle ainsi une stratification thermique en rapport avec la quantité des gains par radiation solaire reçus dans chaque niveau, où le niveau supérieur reçoit la grande quantité par transmission à travers le vitrage de la coupole, étant un matériau translucide qui favorise cette transmission. Ce qui induit une augmentation de la température de l'air interne. Cependant, la hauteur importante d'un atrium ainsi que les apports d'énergie localisés des flux solaires accentuent les variations verticales des températures d'air [BELMAAZIZ, 2003].



**Figure IV. 42 : évolution des écarts des températures de l'air de l'espace atrium au niveau supérieur avec l'extérieur.**

[Source : auteur 2010]

Le grand écart de la température de l'air avec l'extérieur est enregistré dans l'atrium au niveau supérieur, avec une valeur de 4,2°C à 14 :00h (Figure IV.42). Une ambiance adoucie par les apports des radiations solaires, et qui diminue par conséquent les déperditions thermiques des espaces adjacents à travers les parois donnant sur l'espace atrium.

#### IV.7.2.3. Comparaison entre les résultats des deux cas (4 et 5):

La comparaison entre les deux cas est faite entre les résultats des écarts des températures de l'air de l'espace atrium, et des espaces adjacents avec celle de l'extérieur. (Figure IV.43)

Les deux résultats démontrent d'une part, une augmentation dans les deux cas des écarts des températures d'air avec l'extérieur dans l'atrium et l'espace adjacent, cette augmentation est due comme on a déjà évoqué, aux effets de taux d'occupation de l'espace qui constitue une source de gain. D'autre part, les valeurs élevées de ces écarts sont enregistrées dans le cas d'une journée ensoleillée, où l'effet des gains par radiations solaires est bien mis en évidence causant ainsi l'accroissement des températures d'air interne de l'espace atrium où son toit vitré incite la transmission de ces radiations solaires.

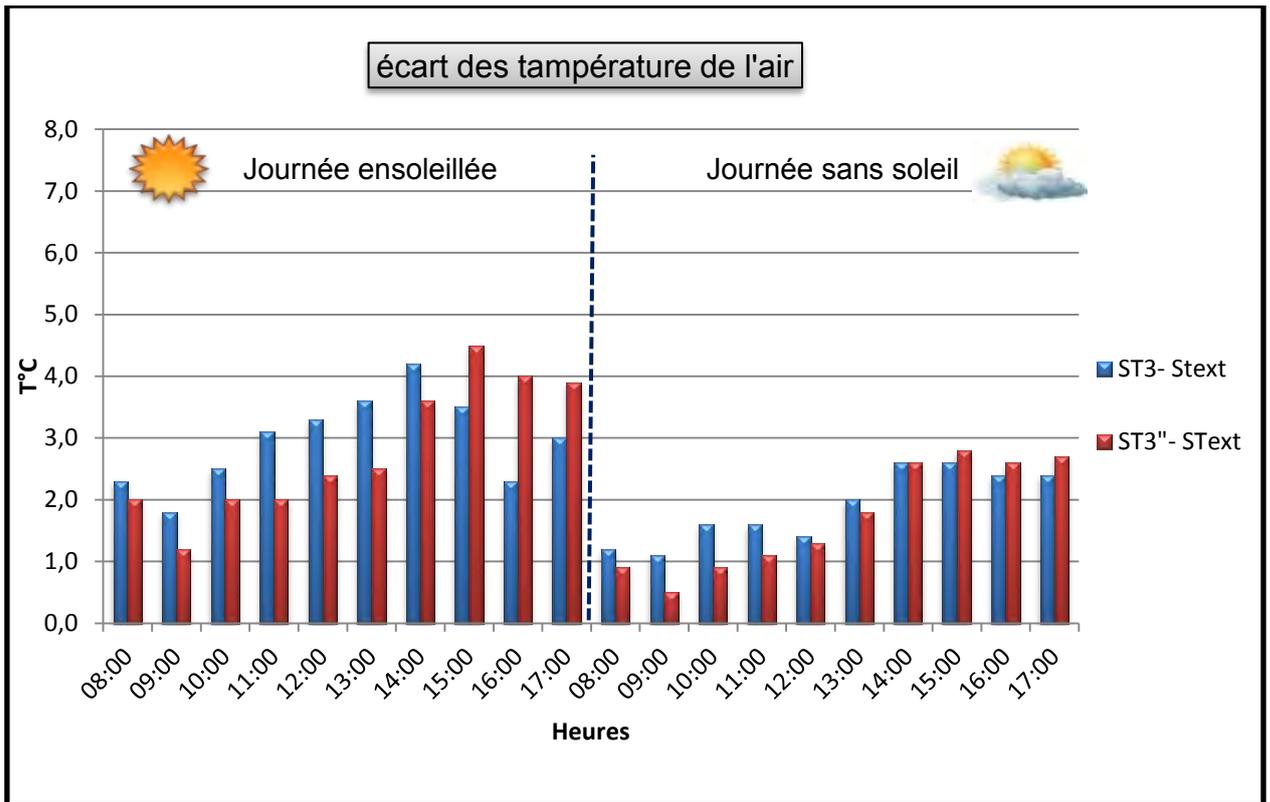


Figure IV. 43 : évolution des écarts des températures de l'air dans les stations ST3, et ST3'' avec l'extérieur dans les deux cas.

[Source : auteur 2010]

**IV.7.2.4. Conclusion de l'investigation hivernale:**

D'après les résultats d'investigation durant la période hivernale, on a pu constater le comportement de l'ambiance interne de l'espace atrium durant cette période, qui dépende fortement des conditions externes, en grand partie de l'effet des radiations solaires, d'où la présence de ces dernières améliore l'ambiance interne de l'espace atrium par l'augmentation de sa température de l'air, et qui influe par suite sur les ambiances de ces espaces adjacents. Donc l'atrium est une stratégie passive afin d'atteindre le confort d'hiver.

**IV.8. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à l'étude des comportements des ambiances internes d'un atrium construit à travers une investigation faite sur un cas réel.

Il est constitué principalement de deux grandes parties:

- ✓ Une partie représentative et descriptive du cas d'étude, débutera par une analyse de contexte climatique de la ville de Jijel où se situe notre cas d'étude, et qui a permis de définir les caractéristiques du climat. Suivie, par une présentation du bâtiment qui abrite l'espace atrium cas d'étude, nos critères de ce choix, et la façon de déroulement de la campagne de mesure avec les différentes stations et scénarios élaborés.
- ✓ Une deuxième partie consacrée à l'analyse des résultats de l'investigation effectuée durant les deux périodes estivale, et hivernale.

Les résultats pour la période estivale obtenus révèlent un comportement thermique classé comme désagréable pendant cette saison causés par les gains solaires excessifs en été, qui est accentué par la couverture vitrée de l'espace atrium, et une stratification thermique de l'air intérieur qui affecte le confort thermique et la performance de l'atrium. Où on a enregistré des écarts qui atteignent  $4,1^{\circ}\text{C}$ , différence entre le niveau inférieur et le niveau supérieur dans le cas N°1 (sans ventilation naturelle). Avec des températures dans l'espace atrium au niveau supérieur qui dépassent les températures de l'air extérieur.

Suivant la conception du bâtiment, et la présence des deux portes au niveau de rez-de-chaussée, on a eu recours à un deuxième scénario, d'une ventilation naturelle transversale à travers ces deux portes. Les résultats ont révélé un rafraîchissement limité au niveau inférieur sans amélioration de l'ambiance du niveau haut, et une surchauffe toujours présente, puisque le renouvellement d'air crée n'atteint pas le niveau supérieur. Malgré que, l'ambiance interne de l'atrium n'est pas amélioré mais on a pu dégager l'effet rafraîchissant de la ventilation naturelle. Bien qu'il soit limité au niveau où on a appliqué cette ventilation.

De ce fait, un troisième scénario est envisagé pour bien prouver l'effet de la ventilation naturelle sur le rafraîchissement intérieur de l'espace atrium. On a étalé cette ventilation transversale au niveau des différents étages. Un rafraîchissement de l'espace atrium est bien senti à travers l'évacuation de l'air chaud stagné sous la coupole cause de la surchauffe. Par le renouvellement d'air, et par conséquence, un degré de stratification thermique amoindri de  $2,4^{\circ}\text{C}$ .

Dans le but de déterminer l'impact thermique de l'espace atrium sur ces espaces adjacents, une comparaison entre l'évolution des températures de l'air des deux espaces

est faite. et qui illustre le degré d'influence de l'atrium exercé sur l'ambiance de l'espace adjacent. Où une amélioration des ambiances thermiques de l'espace atrium contribue à une amélioration des ambiances internes des espaces adjacents.

Il a été déterminé qu'en hiver, l'espace atrium avec sa couverture vitrée peut modifier positivement le bilan journalier de la température en relevant la température maximale par les apports solaires, et en maintenant constamment la température minimale, à une valeur au-dessus de la température extérieure. Elles peuvent également apporter une contribution significative à la réduction de la charge thermique pendant l'hiver.

# CHAPITRE

V



... **Simulation**

## V.1. Introduction :

Etant largement vitré, le comportement thermique d'un atrium dépend des conditions climatiques extérieures. Ce comportement peut être plus ou moins apprécié selon les variations climatiques saisonnières mais pose un réel problème de confort d'été.

L'enveloppe du bâtiment est l'élément le plus crucial à prendre en considération, lors d'une conception architecturale liée à des préoccupations environnementales et de recherche de confort thermique.

La conception d'un bâtiment requiert donc une prise en compte globale et cela nécessite des supports d'aide à la décision adaptés. Cela devient possible grâce aux logiciels d'analyse thermique, devenant des outils analytiques pratiques. Ces outils permettent d'évaluer toutes les variantes possibles de la performance énergétique d'un bâtiment, au stade zéro de la conception dans le but de choisir la meilleure.

Pour compléter la partie investigation nous avons opté pour la simulation numérique car la mesure, présente deux sortes d'inconvénients. D'une part, il est difficile d'entreprendre une comparaison entre les différents scénarios mesurés puisque les conditions externes sont différentes. D'autre part, la limitation des scénarios qu'on peut réaliser, dans la mesure où l'étude de certains paramètres et phénomènes induit des modifications applicables à l'enveloppe de bâtiment. Chose qui est difficile en cas réel.

Le programme de simulation thermique est utilisé dans cette recherche en tant qu'élément complémentaire de la partie investigation pour prévoir le comportement thermique de l'espace atrium et de ses espaces adjacents. Premièrement, des simulations à l'état initial des différents cas déjà mesurés dans la partie investigation pour aboutir à une confrontation des résultats mesurés avec celles obtenues par simulation. Deuxièmement, prouver l'efficacité de la ventilation naturelle comme stratégie passive de rafraîchissement dans les espaces atrium en période estivale. Dans cette optique, deux types de ventilation naturelle seront testés, la ventilation transversale, et la ventilation par tirage thermique. Troisièmement, dégager l'impact du rafraîchissement de l'environnement atrium sur l'amélioration du confort dans les coursives et ses espaces adjacents, lieux praticables par l'individu. Quatrièmement et dernièrement, concerne l'amélioration de l'effet rafraîchissant de la ventilation par tirage thermique en fonction des positions des ouvertures.

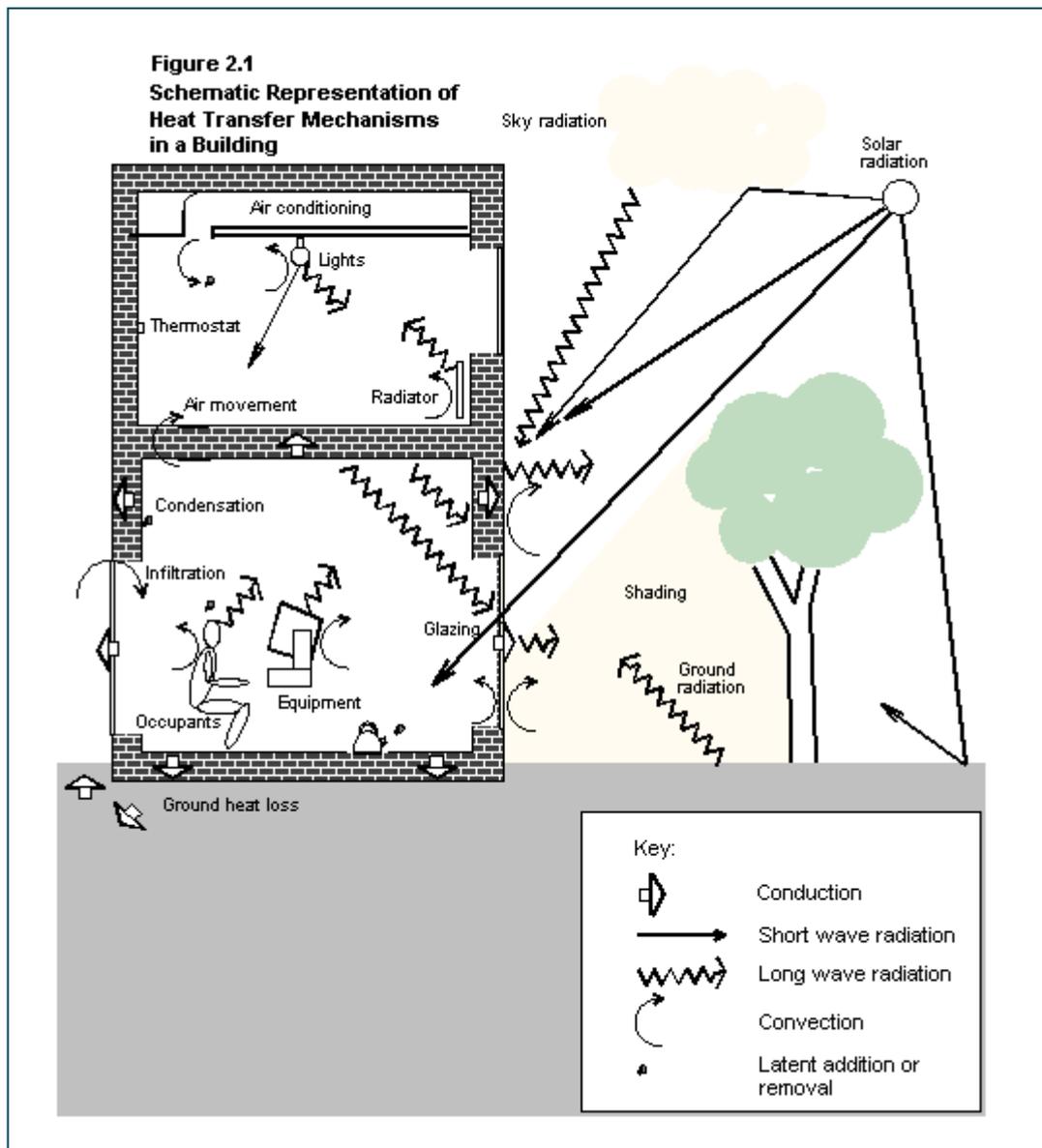
## V.2. Choix et descriptif de l'outil de simulation:

EDSL Tas est l'outil choisi pour la simulation. Le choix de ce programme découle de ses potentialités pour la simulation dynamique, qui prend en considération les différents types des transferts thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment, les gains de chaleur par rayonnement solaire, les températures, les humidités, et la ventilation naturelle, qui sont des paramètres prédictifs de confort.

Le programme choisi pour simuler c'est le logiciel de simulation thermique « EDSL TAS program version 9.1.4.2 », c'est un logiciel de modélisation dynamique de bâtiment et de système de chauffage et de climatisation. Son développement a débuté il ya une dizaine d'années à l'initiative de quelques chercheurs (CAMBRIDGE, CRANFIELD). Depuis TAS n'a cessé d'évoluer et ces concepteurs poursuivent son développement (EDSL Ltd). L'atout majeur de ce logiciel réside dans son interface graphique et ces fonctionnalités. L'utilisateur peut ainsi atteindre une réelle productivité [JP BRASSELET].

L'approche fondamentale adoptée par TAS c'est la simulation dynamique. Cette technique trace au pas de temps horaire le métabolisme du bâtiment en fonction de la météo, de l'enveloppe de bâtiment, et des conditions internes, Fournissant ainsi à l'utilisateur une image détaillée sur les réponses thermiques de bâtiment pour les différentes zones prédéfinies, non seulement dans des conditions extrêmes, mais tout au long d'une année typique. Cette approche influence de nombreux processus thermiques qui se produisent dans le bâtiment, leur synchronisation, endroit et interaction, pour être correctement expliqué.

Ces processus sont illustrés schématiquement dans la Figure V.1, qui montre le mouvement de la chaleur dans diverses formes à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment par une série de mécanismes de transfert de chaleur.



**Figure V. 1 : Représentation schématique des mécanismes de transfert de chaleur dans un bâtiment.**

[Source: TAS theory manuel 2010]

La conduction dans le tissu du bâtiment est traitée dynamiquement, ce procédé efficace calcule le flux de chaleur conductif à la surface des murs et autres éléments de bâtiment. Les constructions de plus de 12 couches peuvent être traitées, chacune des nappes pouvant être composée de matériaux opaques comme les briques, des matériaux transparents comme le verre ou le gaz (l'air), les bases de données des matériaux et les constructions sont disponibles.

La convection sur les surfaces de bâtiment est traitée en utilisant une combinaison des rapports empiriques et théoriques rapportant le débit de chaleur de la convection à la différence de la température, à l'orientation extérieure, et, dans le cas de la convection externe, à la vitesse du vent.

L'échange de rayonnement de longues ondes est modelé en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann, utilisant les émissivités extérieures de la base de données de matériaux. Le rayonnement longues ondes du ciel et de la terre est traité par des rapports empiriques.

Les rayons solaires absorbés, reflétés et transmis par chaque élément de l'édifice sont estimés grâce aux données solaires de dossier météo, le calcul de la transformation, la radiation en composants directs et diffus calculant les flux incidents utilisant la connaissance de la position du soleil et les modèles empiriques des rayonnements du ciel. L'absorption, la réflexion et la transmission sont estimés à partir des propriétés thermo-physiques des éléments de l'édifice.

Des conditions internes, qui incluent les gains des appareils d'éclairage, des équipements et des occupants aussi bien que des caractéristiques de vitesses d'infiltration c'est une opération qui regroupe l'ensemble dans les profils qui sont appliqués aux diverses zones du bâtiment. Des profils de conditions internes peuvent être stockés dans une base de données pour une récupération postérieure.

L'infiltration, la ventilation et le mouvement d'air entre les diverses zones du bâtiment cause un transfert de chaleur entre les masses d'air appropriées qui est représentée par des limites impliquant l'écoulement de la masse, la différence de la température et la capacité de chaleur d'air.

Le rayonnement solaire entrant dans une zone par les éléments transparents de bâtiment tombe sur les surfaces internes, où il peut être absorbé, reflété ou transmis selon les propriétés des surfaces.

TAS résout l'équilibre thermique sensible pour une zone en installant des équations représentant les différents bilans énergétiques pour l'air et chacun des surfaces environnantes. Ces équations sont alors combinées avec d'autres équations représentant les bilans énergétiques sur les surfaces externes, et toute la série d'équation est résolue simultanément pour produire des températures de surface de température de l'air et des charges de pièce. Ce procédé est répété pour chaque heure de la simulation.

Un équilibre latent est également exécuté pour chaque zone qui tient compte des gains latents, du transfert d'humidité par le mouvement d'air et des opérations d'humidification et de déshumidification.

Ce qui suit sont quelques facteurs qui influencent le comportement thermique d'un bâtiment et dont TAS permet à l'utilisateur de les étudier :

- Isolation thermique.
- Capacité thermique (« la masse thermique »).
- Propriétés de vitrage.
- Forme et orientation.
- Climat.
- Ombrage propre et porté des bâtiments voisins
- Ventilation naturelle.
- Ventilation mécanique.
- Gain solaire.
- Gains des appareils d'éclairage, des occupants et d'équipement (sensible et latent).
- Le control des points centraux et les bandes, début optimum, antigel.
- Capacités de l'installation disponibles pour le chauffage et le refroidissement.
- Programmes (scénarios).
- Caractéristiques radiantes/convection.
- Performance des chaudières et des pompes à chaleur.

TAS fournit les résultats sous forme graphique et tabulaire montrant les effets des facteurs ci-dessus à travers les paramètres suivants :

- Température de l'air.
- La température radiante moyenne.
- La température résultante.
- Températures de surface.
- Humidité.
- Risque de condensation.
- Charges sensibles et latentes.
- Consommation d'énergie.

### V.3. Structure du programme EDSL Tas :

Le concepteur de bâtiment « Tas » est un moteur sophistiqué de calcul. Le modeleur 3D (également appelé le « Tas3D ") constitue un des trois composants de noyau qui comportent collectivement le progiciel d'application de concepteur de bâtiment : -

1. Tas 3D Modeller;
2. Tas Building Simulator
3. Tas Results Viewer

Cette illustration de base montre l'ordre typique de l'utilisation en ce qui concerne chaque application dans la suite des trois applications de concepteur de Tas building.



**Figure V. 2 : les trois applications de concepteur Tas**

[Source: introduction to TAS 2010]

3D Modeller (T3D) est utilisé d'abord pour créer la géométrie de bâtiment et pour délimiter et répartir en zones chaque espace (ou volume). La géométrie, les éléments de construction, les zones et les surfaces sont alors exportés vers l'application de simulateur de bâtiment. Pendant le processus d'exportation les calculs des ombres peuvent être effectués.

Tas Building Simulator (TBD) est utilisé pour assigner à chaque élément de bâtiment une construction (cette phase présente l'information convenable concernant les propriétés thermiques fondamentales de l'enveloppe de bâtiment), le fonctionnement des ouvertures sont assignés (y compris le comportement, c.-à-d. leur commande aussi bien que la proportion ouvrable), des conditions internes sont appliqués et un calendrier et des types de jour sont définis.

Le procédé de simulation produit d'un ensemble de données visualisables dans le Results Viewer (TSD).

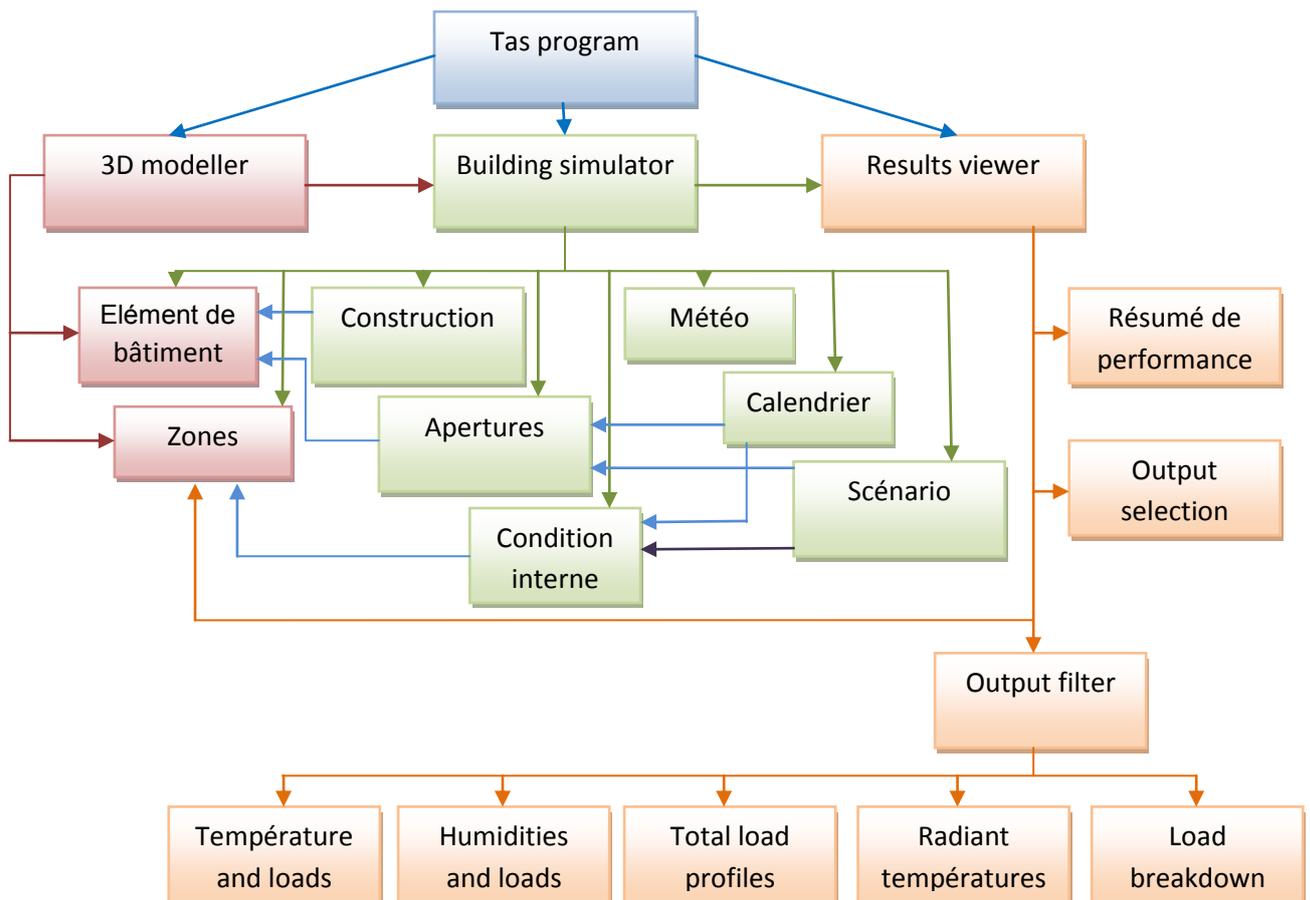


Figure V. 3 : Résumé des relations fonctionnelles entre les différents paramètres

[Source: auteur 2010]

#### V.4. Objectifs de la simulation :

Notre étude consiste à déterminer le comportement thermique de l'espace atrium dans les deux périodes estivale sous notre climat méditerranée. Démontrer la surchauffe provoquée par la grande surface vitrée en été, l'effet de la stratification thermique sur le confort interne dans ce grand espace, et l'effet de la ventilation naturelle sur la distribution verticale de la température.

#### V.5. Démarche de la simulation :

La structure globale du travail de simulation est basée sur les étapes qui suivent :

La première étape englobe une confrontation des résultats de simulation à ceux des mesures (investigation), à partir d'une comparaison entre les températures calculées par le programme et celles de la campagne de mesure, entreprise pour le même bâtiment (Journée 19 Août 2009). La seconde étape vise à trouver la meilleure configuration de la ventilation naturelle, elle démarre du cas réel:

- ventilation transversale au niveau de chaque étage à travers les ouvertures des fenêtres et portes.
- Ventilation verticale par tirage thermique à travers :
  - Des orifices de part et d'autre de la coupole vitrée.
  - Des orifices au centre de la coupole vitrée

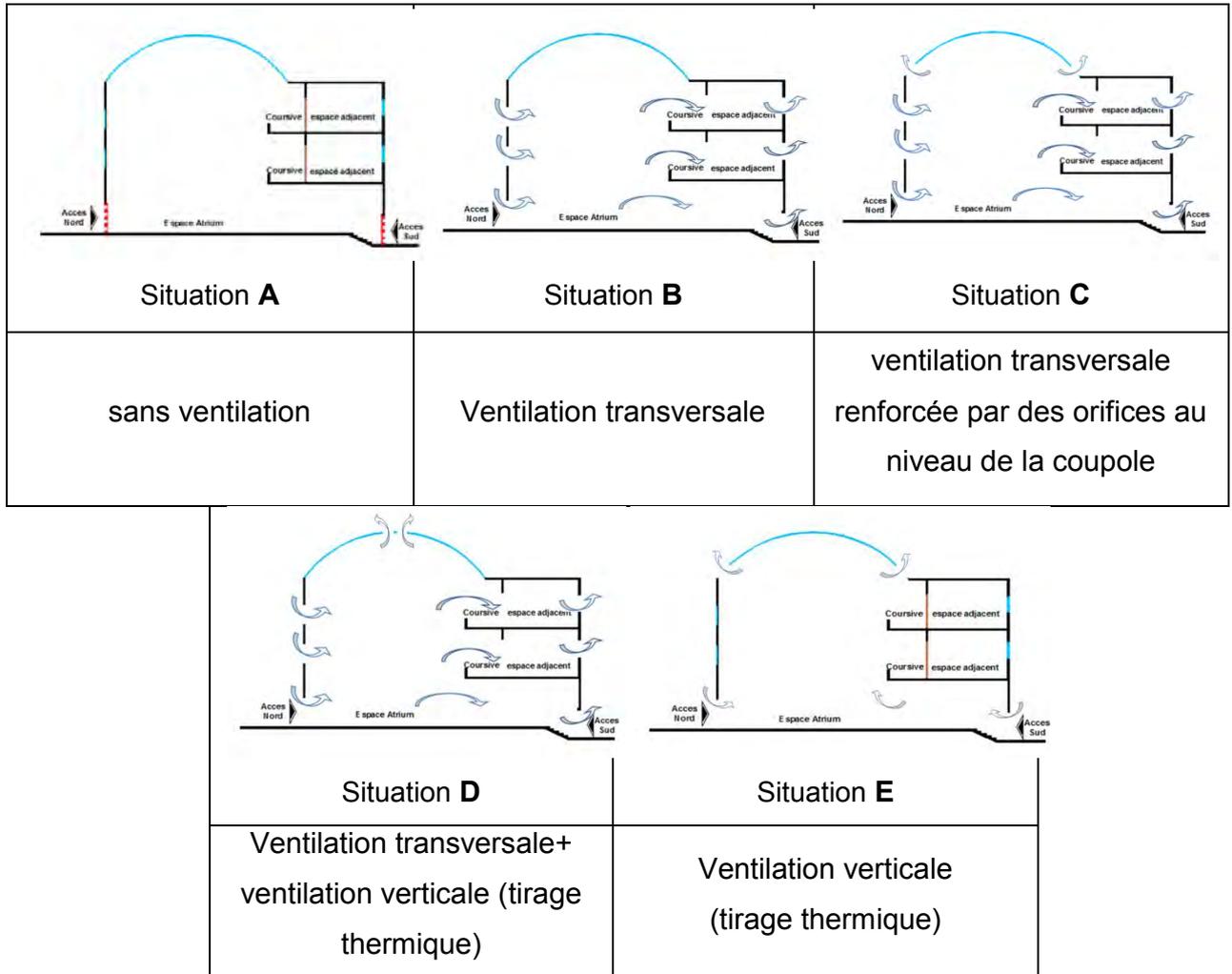


Figure V. 4 : les différents cas de simulation

[Source: auteur 2010]

**V.6. Modèle d'étude :**

Comme on a déjà cité la partie simulation étant un élément complémentaire de la partie investigation donc le modèle simulé c'est le même cas étudié dans le chapitre précédent.

L'atrium de la maison de la culture de la wilaya de Jijel, dont le modèle 3D est illustré sur la (Figure V.5)

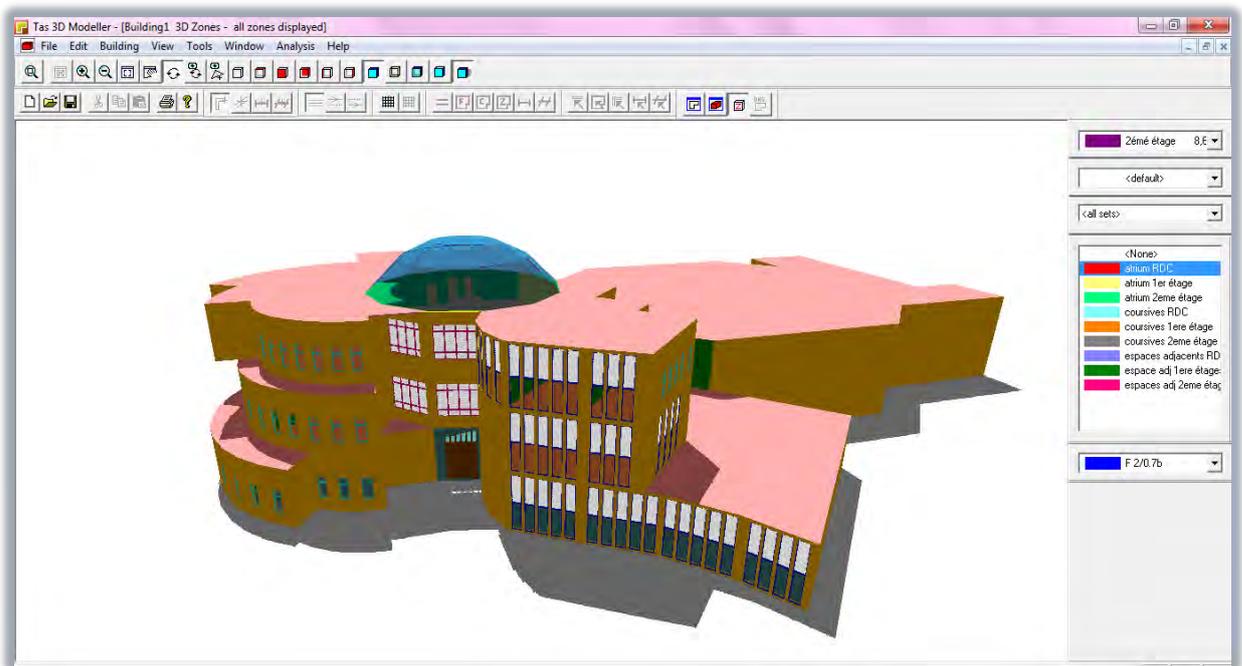


Figure V. 5 : le model cas d'étude réalisé par Tas 3D modeller

[Source: auteur 2010]

Le modèle est réparti en 3 groupes de zones, dans chaque groupe 3 zones représentant les différents espaces à simuler :

1. Zones Atrium : (atrium RDC, atrium 1<sup>ère</sup> étage, atrium 2<sup>ème</sup> étage)
2. Zones Coursives: (coursives RDC, coursives 1<sup>ère</sup> étage, coursives 2<sup>ème</sup> étage)
3. Zones Espaces adjacents: (espaces adj RDC, espaces adj 1<sup>ère</sup> étage, espaces adj 2<sup>ème</sup> étage)

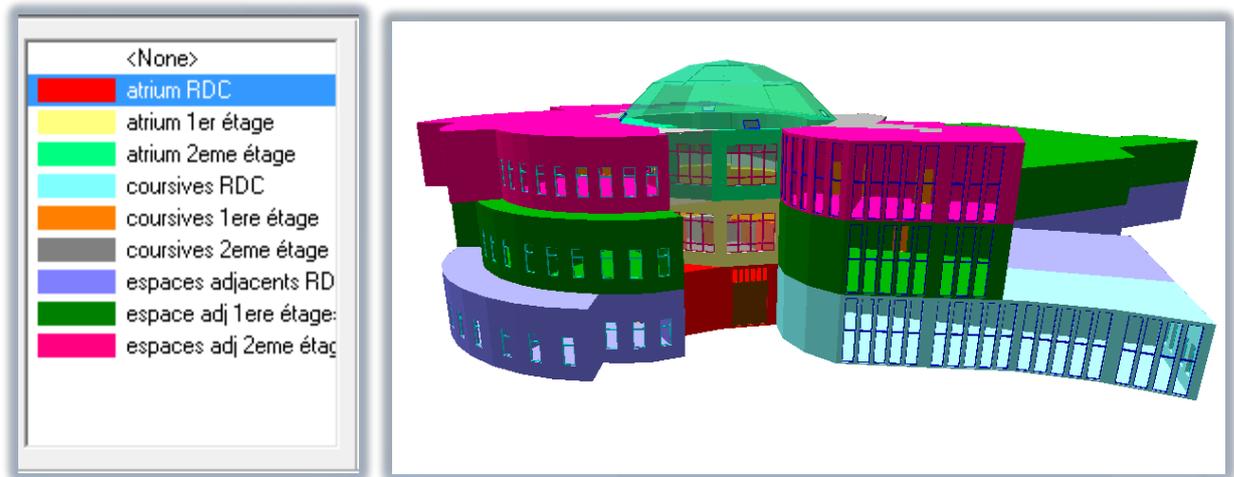


Figure V. 6 : les différentes zones de model 3D

[Source: auteur 2010]

## V.7. Les entrées du programme « Tas Building Simulator »:

### V.7.1. Calendrier :

Le Calendrier contient des informations principales concernant les types de jour, le nombre de jours et de dates. Ces données sont utiles pour décrire les aspects opérationnels du bâtiment. Dans notre cas le calendrier détermine les jours des simulations. (Figure V.7)

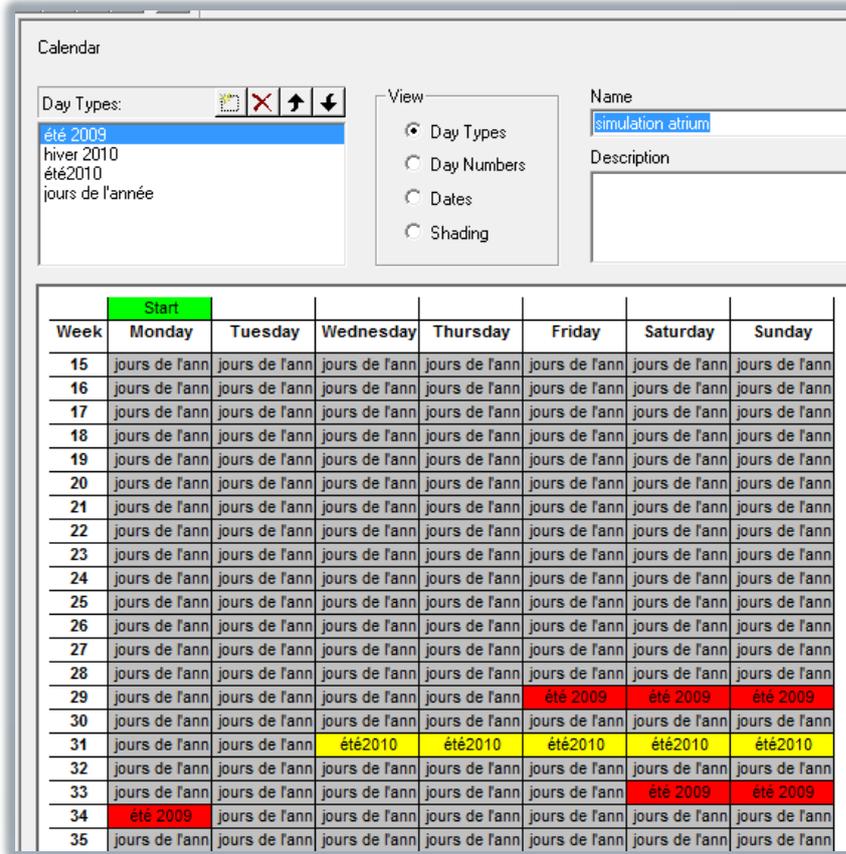


Figure V. 7 : le calendrier utilisé

[Source : auteur 2010]

V.7.2. Le fichier météo :

Pour une simulation précise de l'ambiance interne, les mêmes conditions extérieures des jours d'investigation et une connaissance détaillée du rayonnement solaire, globale et diffus est exigée. Un fichier climatique contenant la température et l'humidité de l'air extérieur, la vitesse et la direction des vents, et le rayonnement solaire pour chaque heure est préparé (Figure V.8). Les données climatiques utilisées proviennent des services de la météorologie, quant au rayonnement globale et diffus, sont tirés de l'atlas solaire [CAPDEROU.1986]

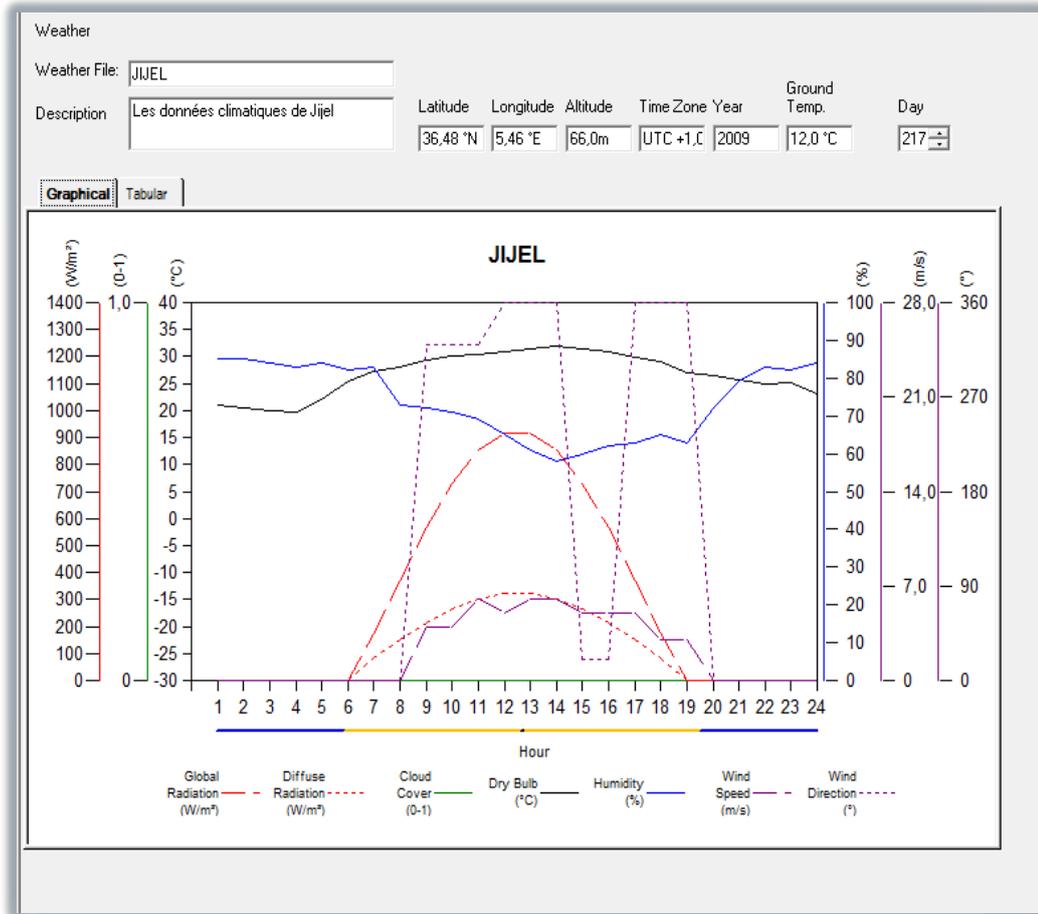


Figure V. 8 : Fichier climatique, relatif aux jours de l'investigation

[Source : auteur 2010]

### V.7.3. Éléments du bâtiment et les constructions :

Pendant le développement du modèle 3D graphique, des éléments de construction ont été assignés aux murs, aux planchers et aux plafonds. (Figure V.9)

Dans l'application « Building Simulator », des constructions sont appliquées à ces éléments de bâtiment. Les constructions définissent la composition et les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés. Des matériaux sont appliqués également aux fenêtres et à leurs armatures, définissant leurs propriétés thermo-physiques, et la transmission solaire. (Tableau V.1 / Tableau V.2)

Building Elements		
Name	Description	Construction
✓ External Wall		Mur exterieur
✓ Internal Wall		Mur interieur
✓ Ground Floor		Plateforme
✓ Upper Floor		plancher intermédiaire
✓ Ceiling		plancher toit
✓ coupole vitrage		4 mm single glazing (clear glass)
✓ Upper Floor/Ceiling		plancher intermédiaire
✓ null-floor/Ceiling		plancher toit
Null	Null Building Element	
✓ F 2/0.7b-frame		Wooden frame
✓ F 2/0.7b-pane		4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 2/0.7 h-frame		Wooden frame
✓ F 2/0.7 h-pane		4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 0.7/0.5-frame	partie haute de la fenetre des bure...	Wooden frame
✓ F 0.7/0.5-pane	partie haute de la fenetre des bure...	4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 1.2/0.7-frame		Wooden frame
✓ F 1.2/0.7-pane		4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 0.8/0.5 b-frame	partie basse des fenetres latéraux ...	Wooden frame
✓ F 0.8/0.5 b-pane	partie basse des fenetres latéraux ...	4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 1.5/0.8 m-frame		Wooden frame
✓ F 1.5/0.8 m-pane		4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 0.8/0.5 h-frame	partie haute des fenetres latéraux ...	Wooden frame
✓ F 0.8/0.5 h-pane	partie haute des fenetres latéraux ...	4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 1.3/0.4-frame	partie de la fenetre de la salle de l...	Wooden frame
✓ F 1.3/0.4-pane	partie de la fenetre de la salle de l...	4 mm single glazing (clear glass)
✓ F 1/0.4-frame	partie de fenetre haute de la porte...	Wooden frame
✓ F 1/0.4-pane	partie de fenetre haute de la porte...	4 mm single glazing (clear glass)
✓ P 3/1.2-frame	partie de la porte principale	Wooden frame
✓ P 3/1.2-pane	partie de la porte principale	porte
✓ Porte simple 2.1/0.94-frame	simple porte interieur	Wooden frame
✓ Porte simple 2.1/0.94-pane	simple porte interieur	porte
✓ F ouvt-frame		Wooden frame
✓ F ouvt-pane		4 mm single glazing (clear glass)

Figure V. 9 : les différents éléments de bâtiment

[Source : auteur 2010]

Tableau V. 1 : les caractéristiques thermo-physique des matériaux utilisés

[Source : D.T.R. C 3-2,1998 ; réadapté par l'auteur]

Nom	Conductivité $\lambda$ (W/m <sup>2</sup> °C)	Capacité thermique c (J/Kg. °C)	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Vapour diffusion factor	Solar Reflectance		Light reflectance		Emissivity	
					Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int
Plâtre courant	0,35	936	960	11	0,6	0,6	0	0	0,9	0,9
Brique creuse	0,48	936	900	8	0,28	0,28	0	0	0,93	0,93
Mortier ciment	1,4	780	1890	19,2	0,6	0,6	0	0	0,9	0,9
Béton	1,45	1080	1450	34	0,35	0,35	0	0	0,9	0,9
Bitume feutre	0,23	1656	1100	99999	0,11	0,11	0	0	0,25	0,25
Gravillons	1,2	792	1800	38,4	0,35	0,35	0	0	0,9	0,9
Dalle corps creux	1,14	1080	2250	34	0,35	0,35	0	0	0,9	0,9
Marbre	2,9	936	2590	99999	0,3	0,3	0	0	0,9	0,9
Lit de sable	0,6	639	1300	99999	0,3	0,3	0	0	0,9	0,9
Bois	0,138	500	2805	11,4	0,4	0,4	0	0	0,9	0,9
Aluminium	230	936	2700	99999	0,5	0,5	0	0	0,22	0,22

	$\lambda$ (W/m <sup>2</sup> °C)	Vapour diffusion factor	transmission solaire	Solar Reflectance		Light transmittance	Light reflectance		Emissivity	
				Ext	Int		Ext	Int	Ext	Int
Vitrage	1	9999	0,82	0,09	0,09	0,89	0	0	0,84	0,84

	Coefficient de convection (W/m <sup>2</sup> °C)	Vapour diffusion factor
La lame d'air	1,25	1

Ces matériaux sont utilisés pour composer les constructions appliquées aux différents éléments de bâtiment :

Tableau V. 2 : composition des constructions utilisées

[Source : auteur 2010]

construction	composition	Epaisseur (mm)	Epaisseur totale (mm)
Mur extérieur	Plâtre courant (enduit intérieur)	20	340
	Brique creuse	100	
	Lame d'air	50	
	Brique creuse	150	
	Mortier de ciment	20	
Mur intérieur	Plâtre courant (enduit intérieur)	20	120
	Brique creuse	80	
	Plâtre courant (enduit intérieur)	20	
Plateforme	Revêtement en Marbre	25	170
	Lit de sable	25	
	béton	120	
Plancher intermédiaire	Revêtement en Marbre	25	270
	Lit de sable	25	
	Dalle à corps creux	200	
	Plâtre courant (enduit intérieur)	20	
Plancher toit	Plâtre courant (enduit intérieur)	20	270
	Dalle à corps creux	200	
	Bitume feutre	20	
	gravillons	30	
porte	bois	30	30
Cadres en bois	bois	50	50
Cadres en aluminium	Aluminium	50	50
Vitrage fenêtre	Vitrage simple	4	4
Vitrage coupole	Vitrage simple	6	6

#### V.7.4. Les conditions internes :

Des conditions internes sont employées pour décrire les gains d'énergie qui viennent d'une zone. Celles-ci incluent les périodes d'occupation avec des gains sensibles et latents des occupants, des gains sensibles et latents des équipements, et des gains d'infiltration, de ventilation et d'éclairage. Également les arrangements de commande pour la température et l'humidité sont préconisés ici. Les conditions peuvent être contrôlées par des scénarios qui sont définis et appliqués aux différents types de jour.

Trois types de conditions internes sont utilisés pour les trois groupes de zones (Figure V.10), pour les détails des conditions internes utilisés voir Annexe D.

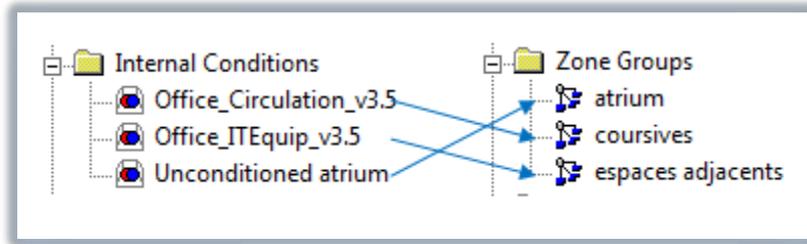


Figure V. 10 : les conditions internes appliquées aux différents groupes de zones

[Source : auteur 2010]

**V.7.5. Les scénarios :**

Les scénarios contrôlent les synchronisations des gains internes, des thermostats, des types d'ouverture, des nuances de dispositif et du mouvement d'air entre les zones. Un seul scénario est utilisé définissant ainsi les heures d'occupation de 8 :00h à 18 :00

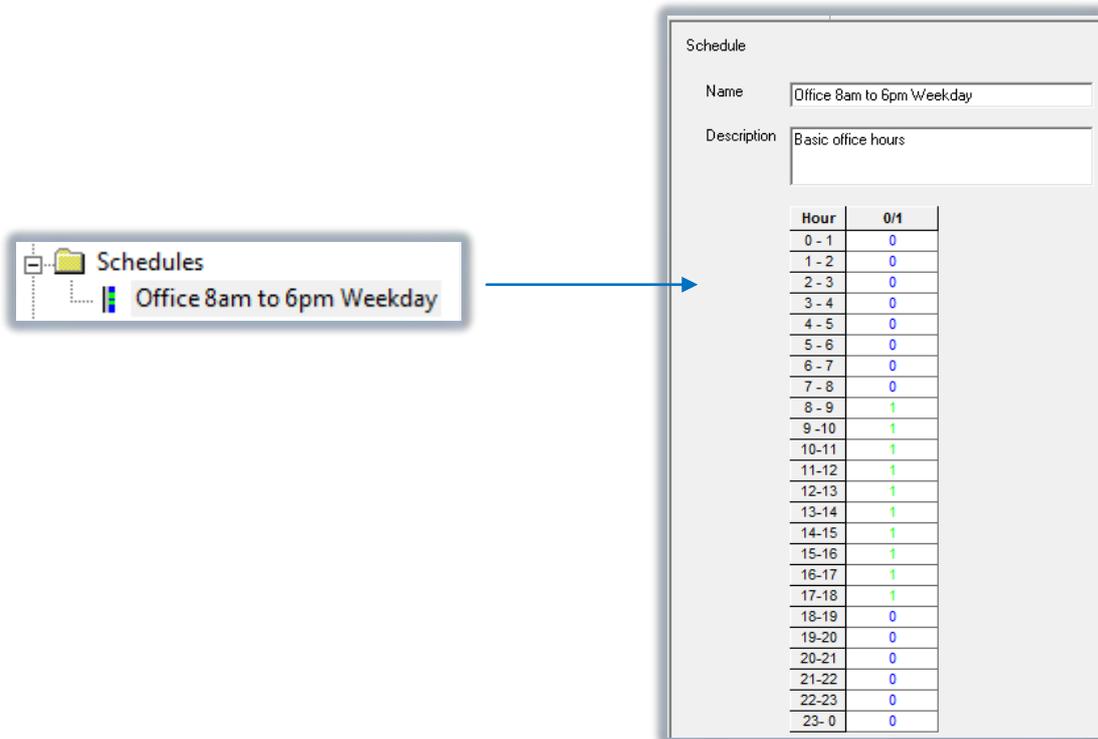


Figure V. 11 : scénario utilisé

[Source : auteur 2010]

**V.7.6. Type d'Apertures :**

Ce service concerne des données spécifiées pour la simulation de la ventilation naturelle. Une ouverture est une ouverture dans un mur ou un plafond par laquelle l'air peut

couler, des profils d'ouverture peuvent être assignés à n'importe quel élément de bâtiment. L'écoulement d'air par chaque ouverture résultant de la pression de vent, la flottabilité (effet de pile), et toutes les circulations d'air personnalisées par l'utilisateur sont calculées par « TAS », ainsi que les transferts associés à la chaleur et l'humidité. Après une simulation, des circulations d'air peuvent être illustrer dans « the result viewer », la valeur de l'ouverture (opening) est la proportion de l'ouverture qui est ouverte (Figure V.12)

Gain	Value	Factor	Setback Value	Schedule
Opening	1,0 (0-1)	1,0	0,0 (0-1)	Office 8am to 6pm ...

**Figure V. 12 : type d'ouverture**

[Source : auteur 2010]

Comme nous l'avons déjà annoncé, il s'agit de tester l'efficacité de la ventilation naturelle comme stratégie passive de rafraichissement dans les espaces atrium en période estivale. Pour cela, nous avons pris deux types de ventilations (transversal et par tirage thermique), successivement l'un est réaliser par l'ouverture des portes et des fenêtres déjà existantes), et l'autre par l'ajout des orifices au niveau de la coupole. Ces ouvertures ont été définies en fonction des possibilités qu'offre l'espace de la structure de la coupole vitrée.

Ces bouches sont considérées comme étant des entrées d'air pour les ouvertures du côté Nord, dans l'optique de capter les vents frais venant de Nord et Nord-est, en plus la géométrie du bâtiment du côté Nord qui forme une sorte de canal collecteur (Effet de Venturi) incite le captage du vent (Figure V.13). En partie haute, nous avons prévu 4 orifices avec des orientations multidirectionnelles. Celles-ci sont modélisées comme étant des entrées/sorties libres.

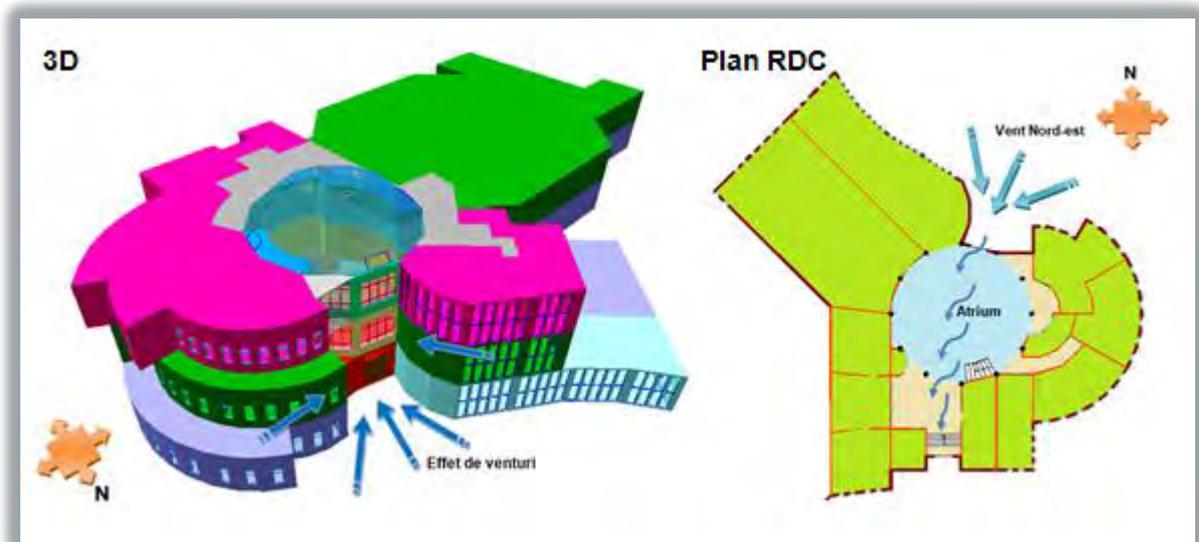
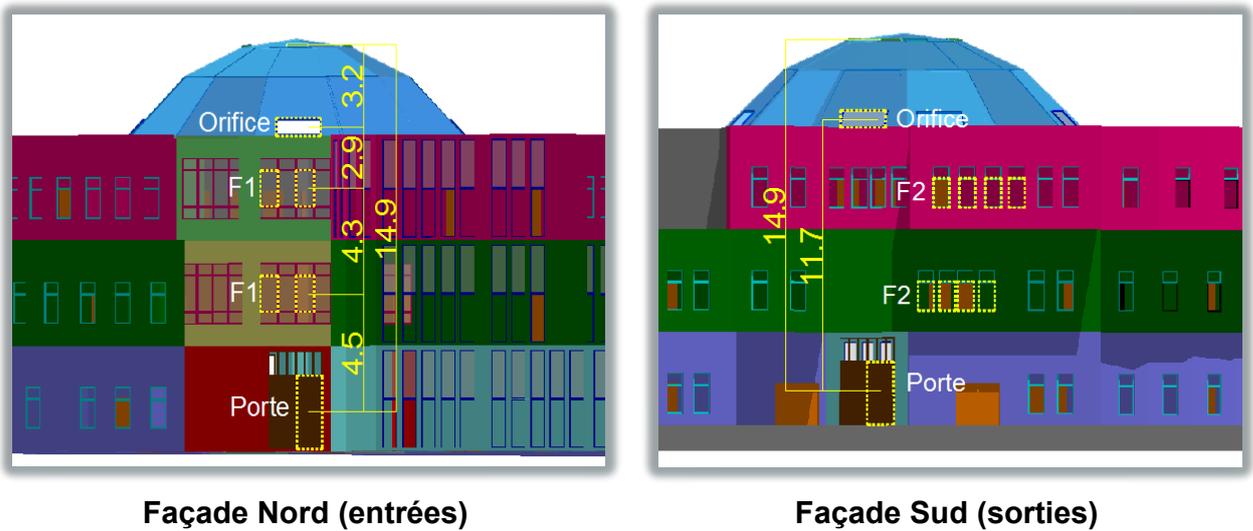


Figure V. 13 : Direction des vents et l'effet venturi

[Source : auteur 2010]



Façade Nord (entrées)

Façade Sud (sorties)

Figure V. 14 : la disposition des ouvertures

[Source : auteur 2010]

Tableau V. 3 : Surfaces des ouvertures

[Source : auteur 2010]

ouvertures	porte	F1	F2	Orifices coupole	
				côté	centre
Surface (m <sup>2</sup> )	2,5	1,2	0.84	1,5	1

## V.8. Résultats et analyse :

Il s'agit ici d'exprimer l'ensemble des résultats relatifs au comportement thermo-aérodynamique issus des simulations par des critères utiles traduisant les conditions d'ambiances intérieures. Il est nécessaire de noter que ces données correspondent à la situation où l'atrium est soumis à des sollicitations d'ensoleillement extrêmes avec un système de renouvellement d'air naturelle.

Ainsi, les critères pertinents qui caractérisent l'ambiance thermique sont les suivants :

- la température d'air au centre du volume
  - le gradient vertical des températures d'air
  - l'identification des zones à différentes températures d'air
- ✓ **La température d'air au centre du volume** : elle représente un niveau moyen du comportement thermique. Pris isolément, ce critère ne peut donner une idée globale sur les températures d'air régnant dans le volume; en revanche, il peut servir comme critère de comparaison entre les configurations.
- ✓ **Le gradient vertical des températures d'air** : il traduit l'importance du phénomène de stratification des températures d'air au centre de l'atrium. Les simulations effectuées montrent que des zones de surchauffes localisées à proximité de la toiture vitrée et du sol, tous deux exposés au soleil, influent sur la différence de températures entre le haut et le bas du volume. C'est pour cette raison que le gradient thermique est évalué sur une hauteur allant de 2 à 12,75 m. De cette manière nous obtenons une image plus réaliste de la stratification.
- ✓ **L'identification des zones par leurs températures d'air** : la valeur du gradient met en évidence l'ampleur de la stratification mais ne permet pas d'avoir des précisions sur la distribution des températures d'air dans le volume. Il est nécessaire dans le contexte d'un atrium de disposer de la répartition des températures, que seuls les images des ambiances thermiques sont capables de traduire. Cette répartition est importante dans la mesure où elle nous permet d'identifier les parties du volume qui sont plus ou moins chaudes par rapport à d'autres.

V.8.1. Confrontation des résultats de simulations à ceux des mesures :

Afin de confronter les résultats des simulations aux résultats expérimentaux, les comparaisons portent sur les variations thermiques pendant les heures d'occupation aux différents niveaux de l'espace atrium, dans le cas sans ventilation.

Le comportement thermique de l'atrium étudié a été simulé pendant la journée du 19 Août 2009.

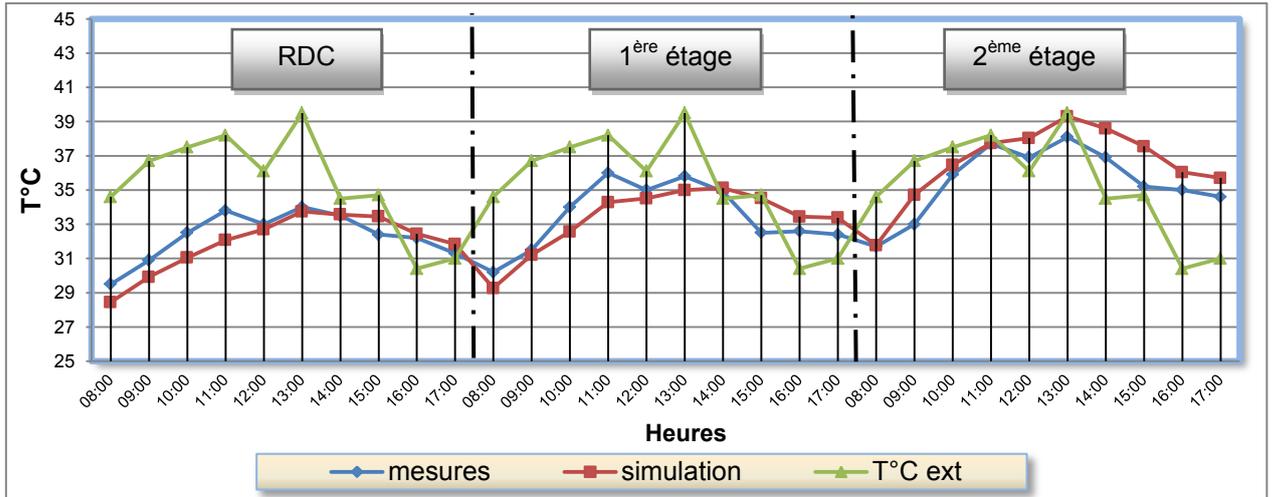


Figure V. 15 : comparaison entre l'évolution des températures d'air dans les différents niveaux de l'espace atrium

[Source : auteur 2010]

Les résultats de la comparaison illustrés dans la (Figure V.15), présentent une évolution similaire entre la courbe des températures d'air mesurées, et celle calculée par le programme « Tas », avec un écart maximal de 2,3°C, alors qu'il est faible aux autres points. Cet écart peut être qualifié d'admissible. Ceci revient au comportement des usagers : bien qu'il soit pris en compte par le programme de calcul, il est évident qu'il n'est pas constant selon les tranches horaires définies pour le logiciel. L'écart observé entre les deux courbes revient également à la température de l'air extérieure utilisée dans le calcul, qui est celle de la station météorologique, le microclimat du site, a certainement ses particularités.

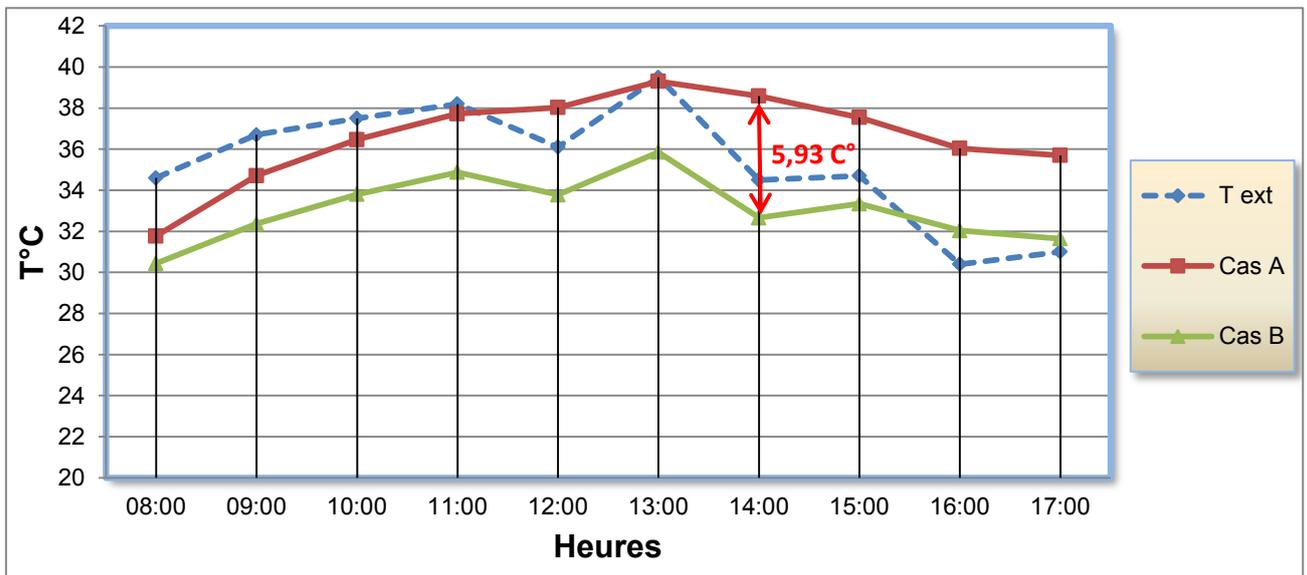
### V.8.2. Effet de la ventilation naturelle :

Certains résultats de simulation sont limités aux résultats enregistrés dans le niveau supérieur vu que ce dernier représente l'état ultime de l'inconfort d'été causé par la surchauffe dans l'espace atrium.

#### V.8.2.1. Effet de la ventilation transversale :

##### V.8.2.1.1. Ambiance interne :

L'étude de l'effet de la ventilation naturelle transversale sur le rafraîchissement de l'ambiance interne dans l'espace atrium est faite à travers la simulation de la situation B qui représente le cas d'une ventilation transversale dans chaque niveau.



**Figure V. 16 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du niveau supérieur de l'atrium du Cas A, et Cas B**

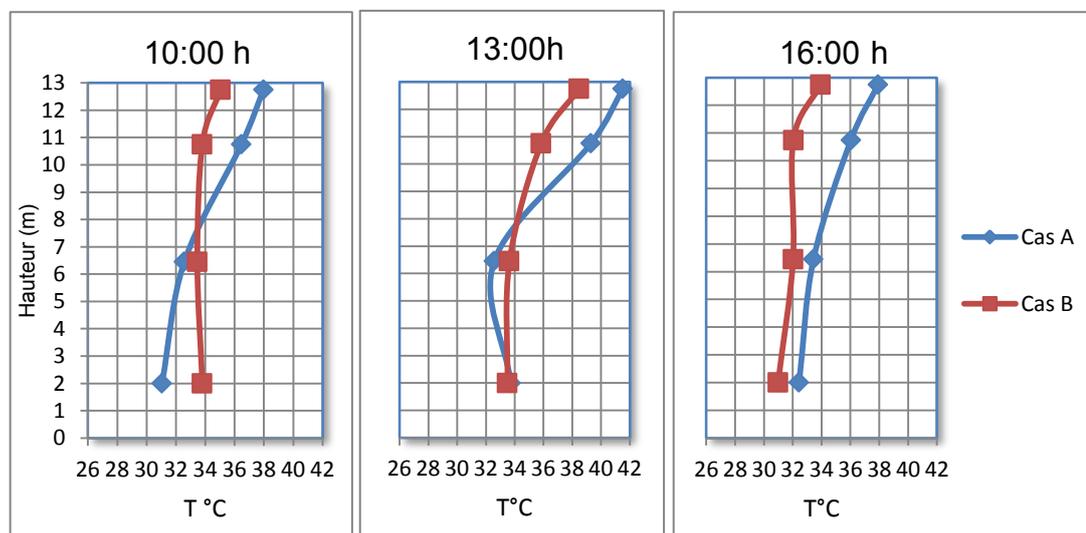
[Source : auteur 2010]

Vue les profils de l'évolution de la température de l'air enregistrés dans le cas B, La ventilation transversale a pu montrer son efficacité à rapprocher l'ambiance intérieure des situations de confort en réduisant la température de l'espace atrium au niveau supérieure de 5,93 °C (Figure V.16), en comparaison avec les températures d'air interne enregistrées dans le Cas A sans ventilation.

## V.8.2.1.2. Stratification thermique :

Afin de quantifier l'impact que peut avoir la ventilation transversale sur l'ambiance thermique, il est indispensable de comparer les profils thermiques correspondant aux deux cas (sans ventilation et avec ventilation transversale). Pour permettre la comparaison, la figure suivante présente les gradients thermiques obtenus au centre de l'atrium. La confrontation des résultats fait nettement apparaître que les températures d'air dans le cas A sont plus importantes et présentent des écarts de température entre le niveau bas et le niveau supérieur de l'espace et qui varie entre 5,49 à 7,79 °C, ce sont des écarts plus élevés que lorsque l'atrium est soumis à une ventilation naturelle, permettant une réduction des écarts jusqu'à 1,5 à 4,99°C. (Figures V.17). Ces écarts peuvent être expliqués par le fait que dans le cas sans ventilation, les températures sous la toiture vitrée sont plus importantes générées par les radiations solaires directes à travers le vitrage, et la stagnation de l'air chaud en absence d'un renouvellement d'air. Ce dernier qui est favorisé dans le cas B avec une ventilation transversale.

La stratification est plus accentuée à 13 :00h où on enregistre le maximum des écarts dans les deux cas. Sachant que. Durant cette heure, le soleil est pratiquement vertical sur la coupole, et l'atrium reçoit le maximum des gains journalier par radiation solaire,



**Figure V. 17 : comparaison entre les gradients thermiques dans l'espace atrium de Cas A et B**

[Source : auteur 2010]

### V.8.2.2. Effet de la ventilation par tirage thermique (effet de cheminée) :

#### V.8.2.2.1. Ambiance interne :

Un autre cas a été élaboré afin d'étudier l'effet de la ventilation naturelle par tirage thermique, un phénomène généré en grande partie par la conception de l'atrium cas des grandes espaces. Une amélioration de ce type de ventilation est faite. En effet, des orifices au niveau de la coupole vitré sont envisagés (4 orifices de 1m<sup>2</sup> de surface au centre de la coupole, et avec des orientations multidirectionnelles). Ce cas de figure est observé dans la situation E.

D'après les courbes de l'évolution de la température de l'air dans l'espace atrium au niveau supérieur (Figure V.18), une baisse de températures est bien illustrée en comparaison aux deux cas, le cas E de la ventilation par tirage thermique, et le cas A sans ventilation, la température interne est diminuée de 6,32°C à 14 :00h, heure où l'espace reçoit le maximum de gains solaires à travers la coupole vitrée. La ventilation par tirage thermique évacue l'air chaud stagné sous la toiture vitrée en assurant un renouvellement d'air continu.

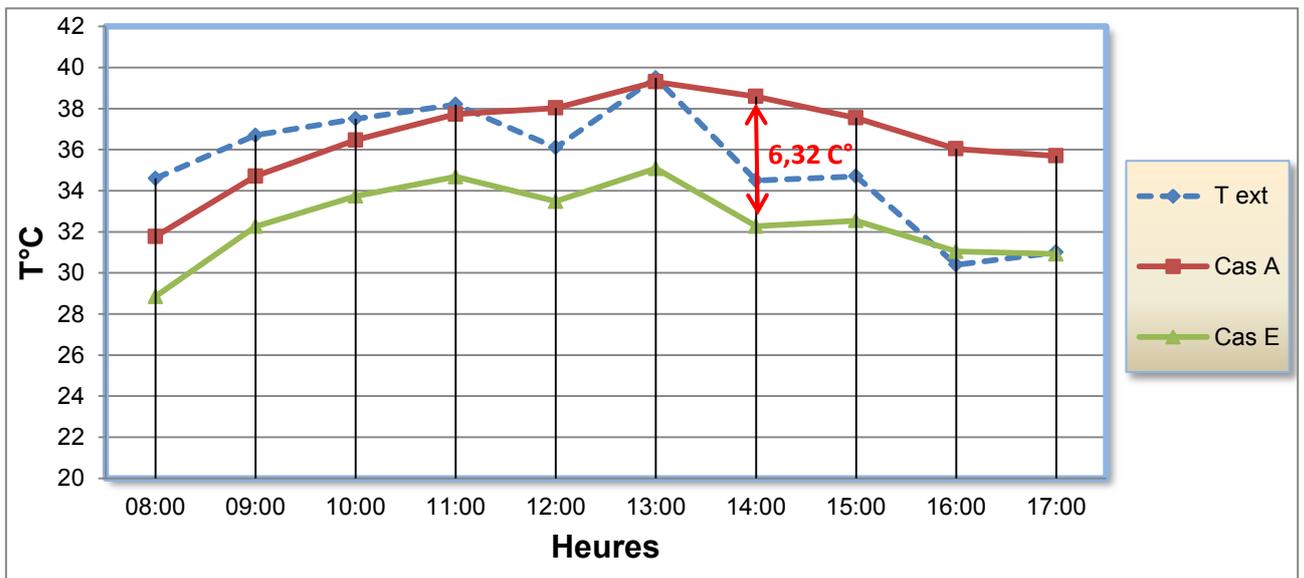
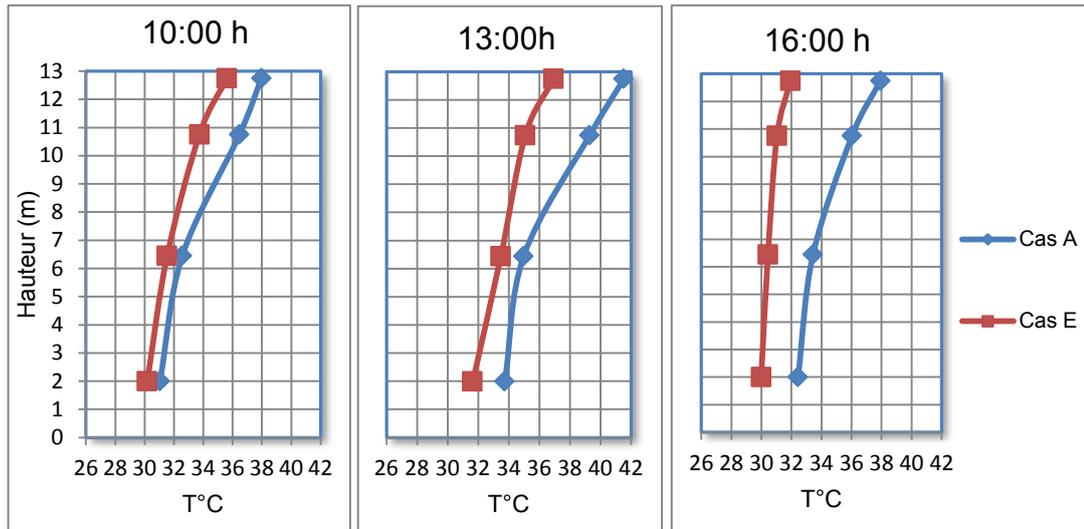


Figure V. 18 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du Cas A, et Cas E

[Source : auteur 2010]

### V.8.2.2. Stratification thermique :

L'effet de la ventilation par tirage thermique sur la stratification est bien illustré dans les gradients thermiques par une faible stratification des températures d'air entre le bas et jusqu'à 11 m de hauteur en comparaison avec celle du Cas A sans ventilation (Figure V.19). Ces résultats rejoignent ceux enregistrés dans le Cas B, où la ventilation est transversale.



**Figure V. 19 : comparaison entre les gradients thermiques dans l'espace atrium de Cas A et E**

[Source : auteur 2010]

#### V.8.2.1. Comparaison entre l'effet de la ventilation naturelle transversale et celle par tirage thermique (effet de cheminée) :

L'évolution des écarts de température d'air dans l'espace atrium entre les cas avec et sans ventilation naturelle, démontre l'effet rafraichissant de cette dernière par la baisse de la température de l'air interne en assurant une évacuation de l'air chaud par renouvellement d'air.

Les résultats démontrent que les écarts sont un peu plus importants avec une ventilation par tirage thermique que par ventilation transversale (Figure V.20). Cela est dû aux différents paramètres qui agissent sur les deux cas de ventilation. Les mouvements d'air par ventilation transversale sont créés par les différences de pression dues au vent entre les façades, par contre l'effet de cheminée (tirage thermique) est dû à la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid. Cette dernière favorisée par la spécificité de

l'enveloppe de l'espace atrium, l'air au niveau supérieur sous la toiture vitrée est chauffé par rayonnement solaire, accentuant la différence de densité de l'air dans l'espace entre le niveau bas et le niveau supérieur. L'air frais pénètre à travers les ouvertures de la partie basse, et l'air chaud quant à lui sort à travers les ouvertures de la partie haute. Donc les débits atteints sont nettement plus importants que dans le cas de la ventilation transversale.

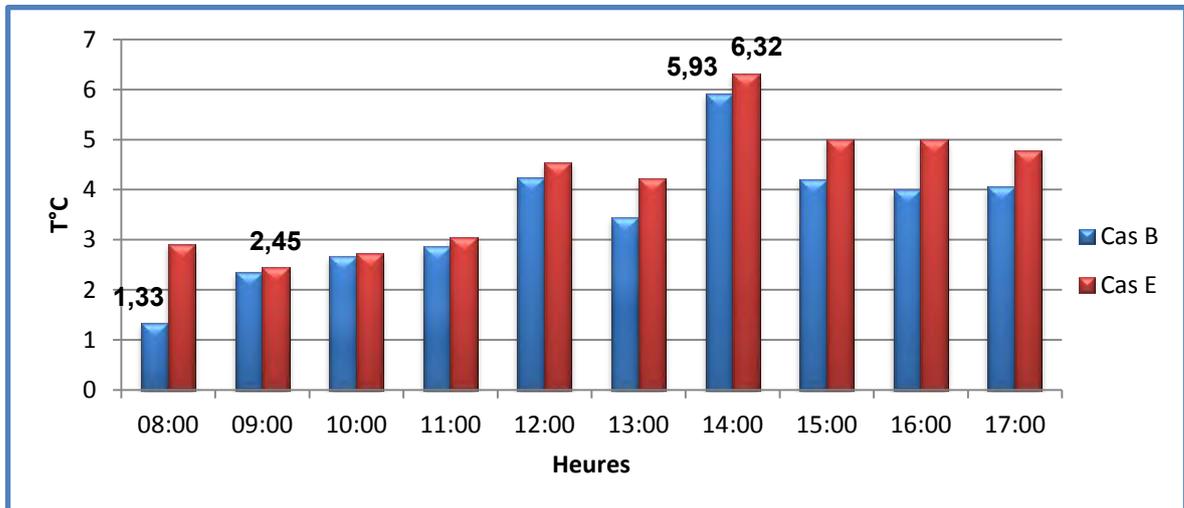


Figure V. 20 : évolution de l'écart de la température d'air des deux cas B et E

[Source : auteur 2010]

#### V.8.2.2. L'impact de l'ambiance thermique de l'espace atrium sur les espaces adjacents:

Vu que l'espace atrium constitue à la fois un espace intérieur et extérieur, son environnement interne affecte le confort dans les espaces adjacents, pour démontrer l'impact de l'amélioration de l'ambiance interne de l'espace atrium sur ses espaces adjacents, une comparaison est faite, entre l'évolution des températures d'air au dernier étage des deux cas A et E, dans l'espace atrium, coursives, et espaces adjacents.

Cependant, les profils des températures d'air interne dans les deux cas suivent les mêmes allures, avec une baisse des températures enregistrée dans les différents espaces pour le cas E (représente le scénario de la ventilation naturelle par tirage thermique). On constate une diminution de température dans l'espace adjacent qui atteint le 2.69°C à 12:00h (Figure V.21), et qui est en corrélation avec la diminution de température d'air enregistré dans l'espace atrium. Ceci est dû aux effets rafraichissants de la ventilation naturelle par tirage thermique. Du fait que l'espace atrium constitue un environnement extérieur pour ses espaces adjacents, donc une amélioration de son environnement

thermique génère par la suite une amélioration dans les ambiances thermiques des espaces qui l'entourent.

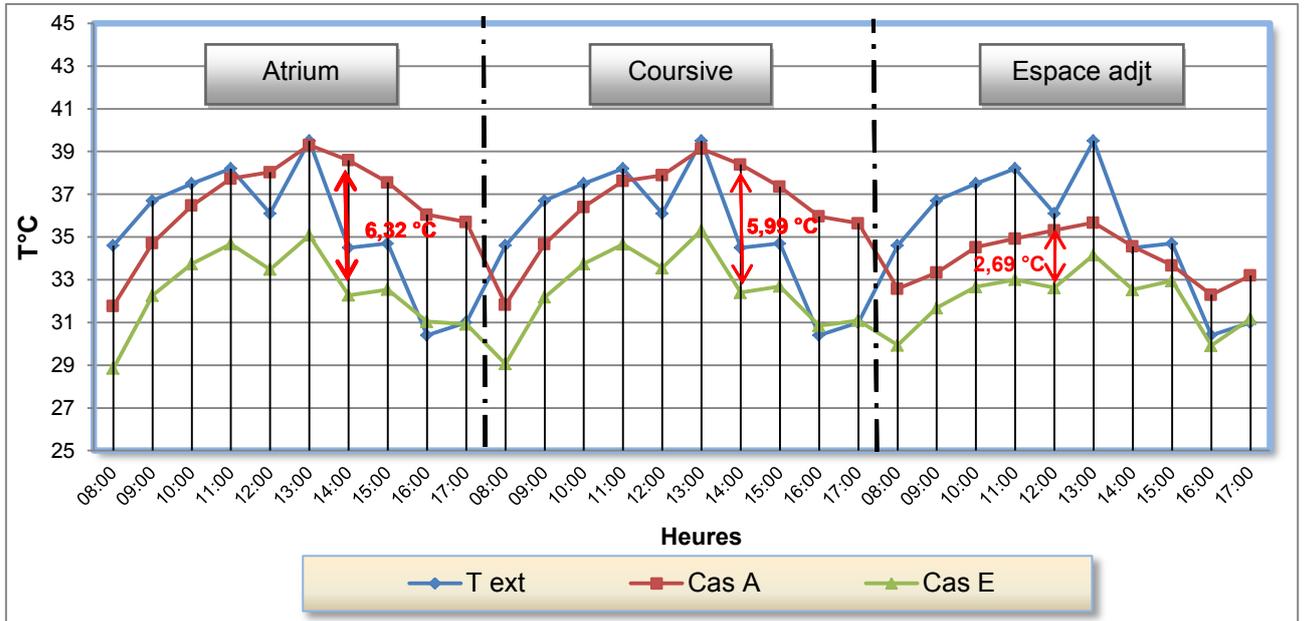


Figure V. 21 : comparaison entre l'évolution des températures d'air dans les différents espaces de dernier étage

[Source : auteur 2010]

**V.8.2.3. L'effet de la ventilation par tirage thermique en fonction des positions des ouvertures:**

Dans le but de déterminer la position adéquate des ouvertures qui permet une bonne ventilation dans l'espace atrium, deux cas de figure ont été simulés, le Cas C et le Cas D.

Une comparaison entre l'évolution de la température de l'air interne au niveau supérieur dans l'espace atrium des deux cas est représentée dans la (Figure V.22). Une baisse de température de l'air interne par rapport aux températures extérieures dans les deux cas est bien illustrée, cela est dû à l'effet rafraichissant de la ventilation, Comme on a déjà vu dans l'effet de la ventilation par tirage thermique.

Les températures de l'air enregistrées dans le cas C, (où les ouvertures sont placées de part et d'autre au niveau de la coupole), sont un peu plus élevées que celles du cas D où les ouvertures sont prévues au sommet de la coupole. Cette différence de température entre les deux cas est due aux différences entre les débits d'air traversant l'espace. D'après la formule de débit d'air "D" traversant la construction [HAZIM.B. 2003]:

$$D = 400.S.c.[h.(t' - t)]^2$$

S : représente la surface des orifices d'entrée

c : est un coefficient dépendant du rapport des surfaces des orifices de sortie et d'entrée

h : est la dénivellation entre les orifices de sortie et des orifices d'entrée

t' : est la température moyenne à l'intérieur en °C

t : est celle de l'air extérieur en °C

Le débit d'air est en fonction de la hauteur entre les ouvertures d'entrées et sorties d'air, suivant la configuration du cas D, cette hauteur est plus importante que celle du cas C, ce qui signifie un débit d'air entrant plus important, accentuant par suite un rafraîchissement par baisse de température.

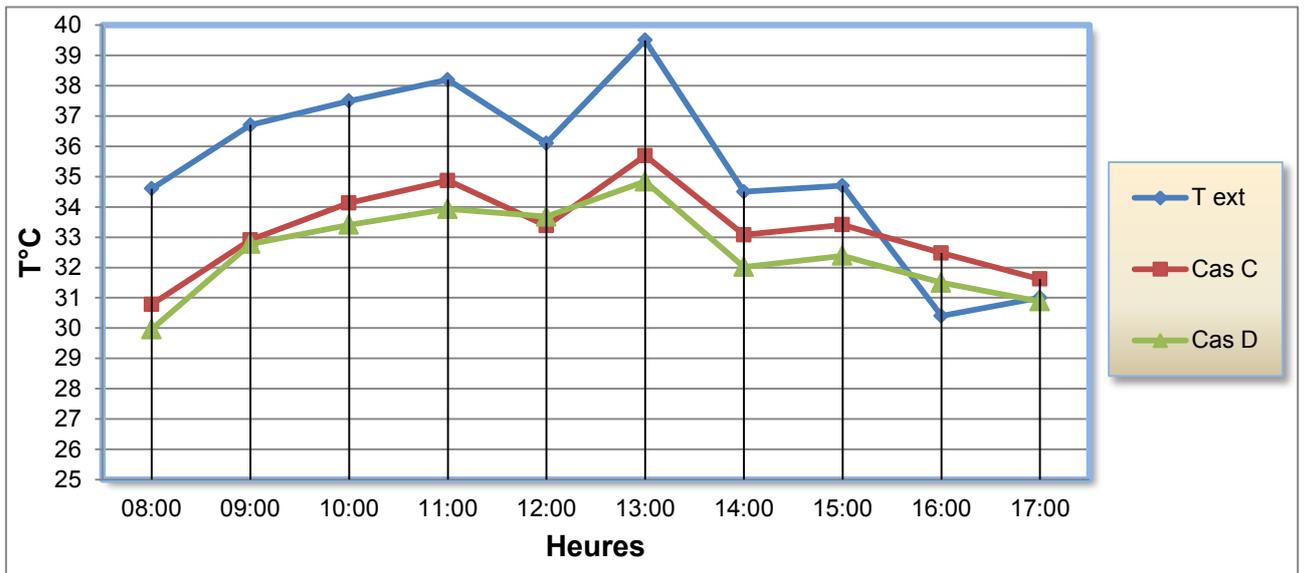


Figure V. 22 : comparaison entre l'évolution des températures d'air intérieur du Cas C, et Cas D

[Source : auteur 2010]

### V.8.3. simulation des ambiances thermo-aéraulique internes :

A partir des résultats obtenus par le module « Tas Résultat viewer » pour le modèle étudié (températures de l'air intérieur, températures surfaciques, débits et vitesse d'air...etc.), une analyse fine des champs de température, d'humidité, et de vitesse d'air dans un plan vertical dans une zone quelconque peut être réalisée par le module « AMBIENS » du logiciel « Tas Program ».

Les températures d'air calculées par le module « Tas building simulator » sont des valeurs moyennes pour chaque zone. Lorsque des variations significatives de ce paramètre sont prévisibles, une analyse plus détaillée des conditions d'ambiance, pour une heure donnée, doit être réalisée par le module « AMBIENS ».

**Tableau V. 4 : les conditions appliquées pour le module « AMBIENS »**

[Source : auteur 2010]

Conditions internes	Start T°C	10h	33,5°C	La température moyenne des différentes zones
		13h	35,8°C	
		16h	35,2°C	
	External Work	0		égale à zéro pour la plus part des activités [ISO 8996-1990: Ergonomics: Determination of Metabolic heat production].
Metabolic Value	1,2		Pour les activité standard (administration, école, laboratoire..etc) [ISO 8996-1990: Ergonomics: Determination of Metabolic heat production].	
Clothing Value	0,5		Tenue d'été légère [ISO 7730-1984 (E): Moderate thermal environments]	
Ouvertures	T (°C)	35		Température de l'air extérieur
	Vitesse de l'air (m/s)	RDC	0,144	valeurs obtenus par le module « Tas Résultat viewer ».
		1 <sup>er</sup> étage	0,106	
		2 <sup>ème</sup> étage	0,167	
HR (%)	43		Humidité relative de l'air extérieur	
Parois	T°C surfacique	(Voir Figure V.20)		valeurs obtenus par le module « Tas Résultat viewer ».

Nous présentons ici les champs des différents paramètres qui constituent l'ambiance à des heures représentatives de la journée pour différents cas :

➤ Température de l'air :

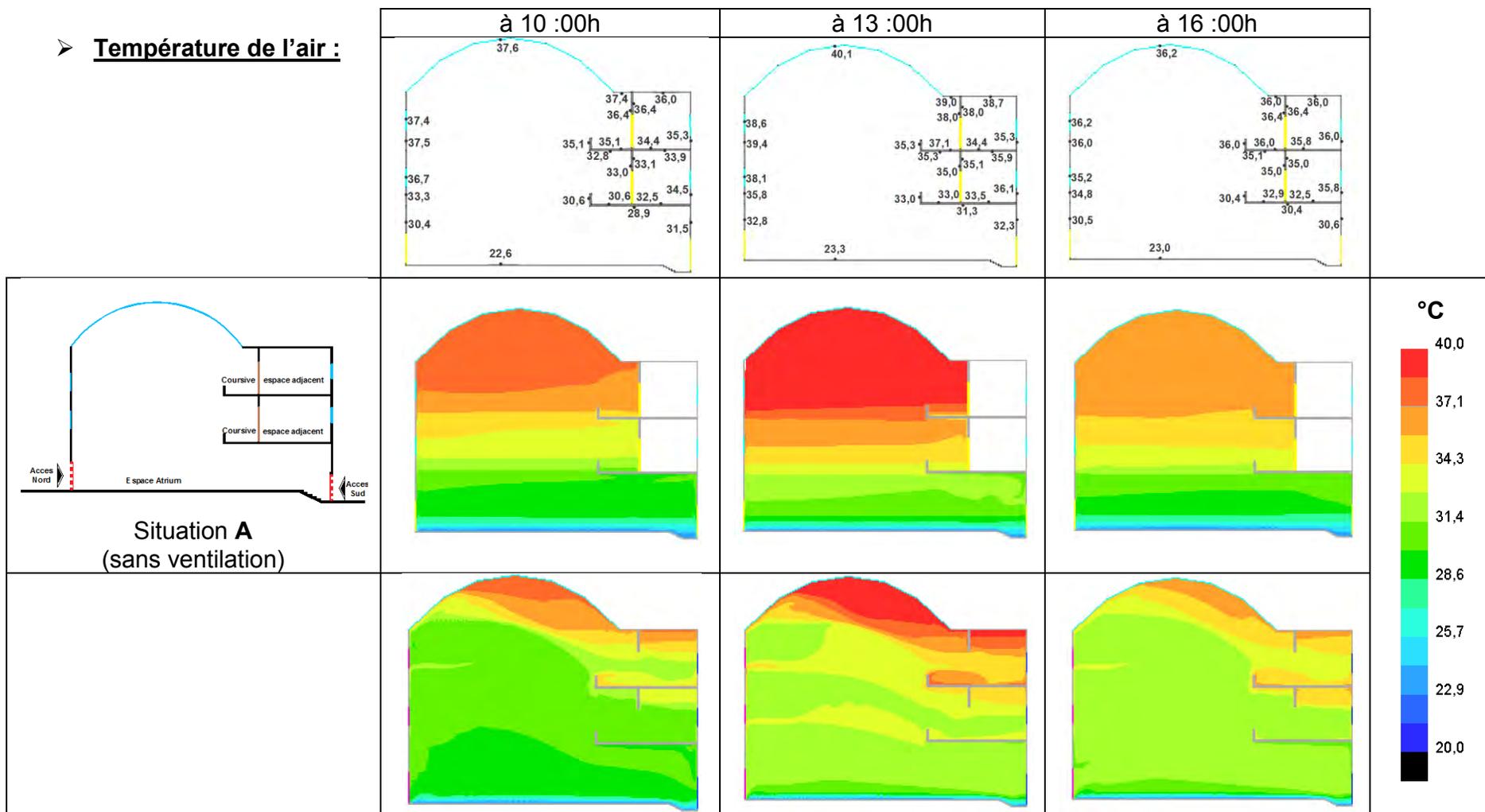


Figure V. 23 : champs des températures correspondants aux situations A et B ainsi que les températures de surfaces

[Source : auteur 2010]

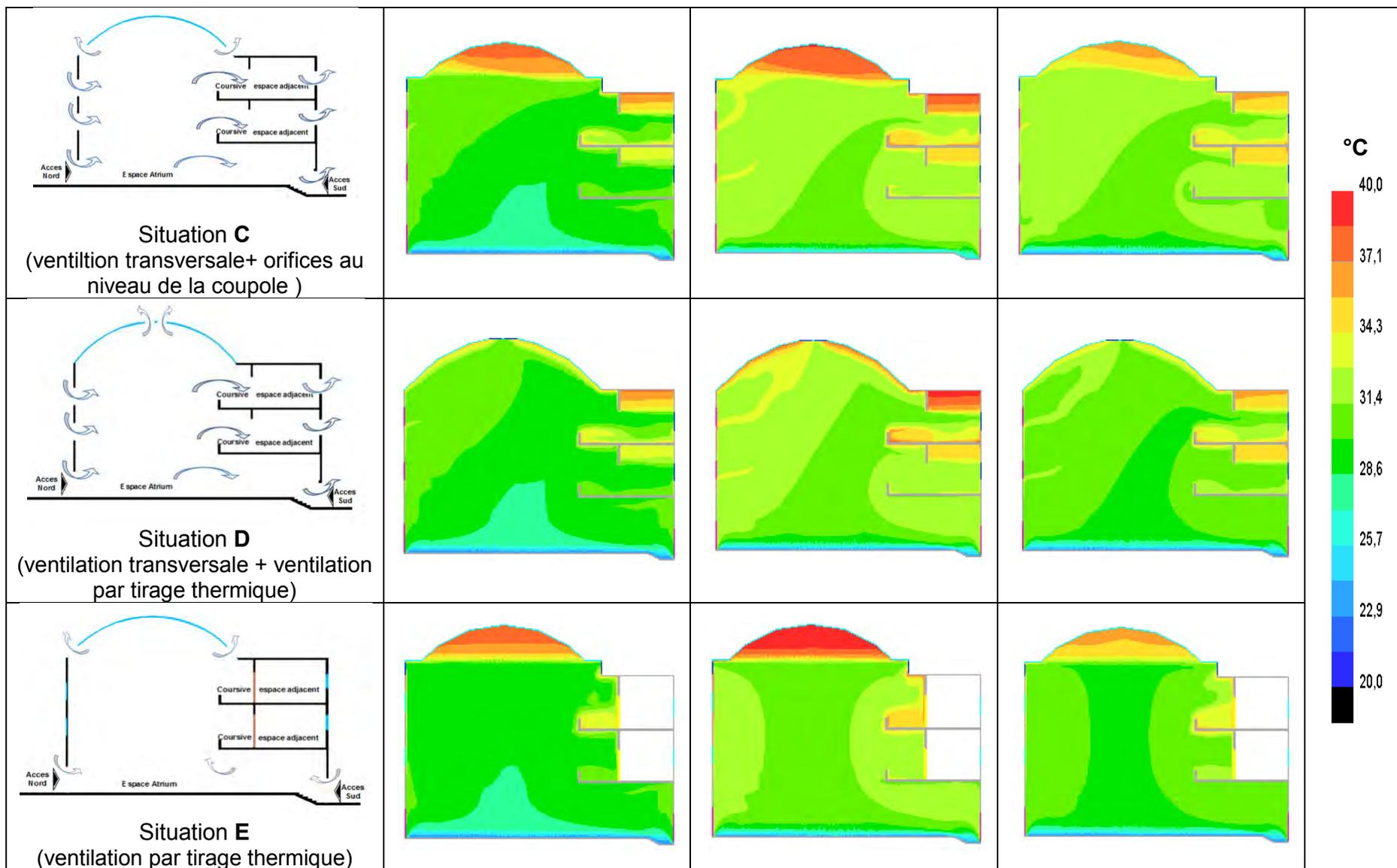


Figure V. 24 : champs des températures correspondants aux situations C, D et E ainsi que les températures de surfaces

[Source : auteur 2010]

Pour les cinq situations testées, Les résultats obtenus montrent une variation entre les températures d'air des parties basses et hautes de l'atrium. Cela paraît évident dans la mesure où les parois sont sollicitées par le rayonnement solaire (Figure V.23 - 24).

À 13 :00h dans les différentes situations simulées les températures d'air sont plus prononcées comparées aux résultats des simulations faite à 10 :00 et 16 :00h. C'est à ce moment que l'ambiance thermique de l'atrium devient la plus critique. Comparées aux résultats obtenus à 10 :00 et 16 :00h, les simulations effectuées à 13 h montrent un important gradient thermique (selon la situation simulée). Des températures d'air assez élevées sont enregistrées à partir du 2<sup>ème</sup> étage. En ce qui concerne la situation A, celles-ci atteignent un maximum de 40,1 °C à 13 :00h près de la toiture. Alors que, l'air de la partie basse reste à une température avoisinant 23,6 °C, dont l'écart s'élève à 16,5°C.

Cette hétérogénéité importante des températures est essentiellement due à une zone d'air très chaude qui se trouve piégée dans la partie située sous la toiture. A ces endroits les températures d'air sont très affectées par les températures de surfaces qui sont élevées. Celle de la toiture par exemple est de 40,1 °C.

Dans les autres situations la présence d'une ventilation naturelle soit transversale ou par tirage thermique influence l'ambiance thermique interne par une baisse des températures, mais avec des degrés qui différents suivant la modélisation de la ventilation naturelle.

Dans le cas de la ventilation transversale (situation B), on remarque une baisse des températures d'air, avec une stratification moins prononcée que celle illustrée dans le cas de sans ventilation. Les résultats enregistrés à 13 :00h sont les plus critiques par rapport à celles de 10:00h et 16 :00h, où malgré la présence d'un renouvellement d'air, on remarque une localisation d'un air chaud au niveau de la concave de la coupole vitrée, cela peut être traduit par l'absence d'un renouvellement d'air à ce niveau, que la ventilation naturelle transversale n'a pas pu l'assurer, vue la géométrie de la coupole.

Dans cet axe, des orifices sont prévus au niveau de la coupole, avec deux positions différentes (situation C et D), ou à travers ces orifices une combinaison entre deux type de ventilation naturelle (transversale et par tirage thermique) est faite. La position des orifices au

niveau bas de la coupole a permet d'abaisser légèrement les températures d'air au niveau de la coupole. Bien que, des meilleurs résultats sont enregistrés avec des orifices positionnés au centre de la coupole (situation D). Ce rafraichissement de l'ambiance interne exprime un bon balayage de l'air chaud pour l'ensemble du volume, assurer par une ventilation transversale qui agit horizontalement au niveau des différents étages, et renforcer par une ventilation par tirage thermique gérée entre les deux ouvertures de niveau bas et de la coupole, qui agit verticalement évacuant ainsi l'air chaud stagné dans la concave de la coupole vitrée.

La situation E décrit le cas d'un renouvellement d'air géré par une ventilation par tirage thermique, un rafraîchissement est bien illustré dans l'espace atrium avec une zone de surchauffe localisée sous la coupole, les résultats sont classée moins satisfaisantes par rapport à la situation D.

Donc la situation D, où la ventilation naturelle transversale et par tirage thermique, ont prouvé leur efficacité dans le rafraichissement de l'espace atrium, engendrant ainsi un établissement d'un confort meilleur.

➤ Humidité relative :

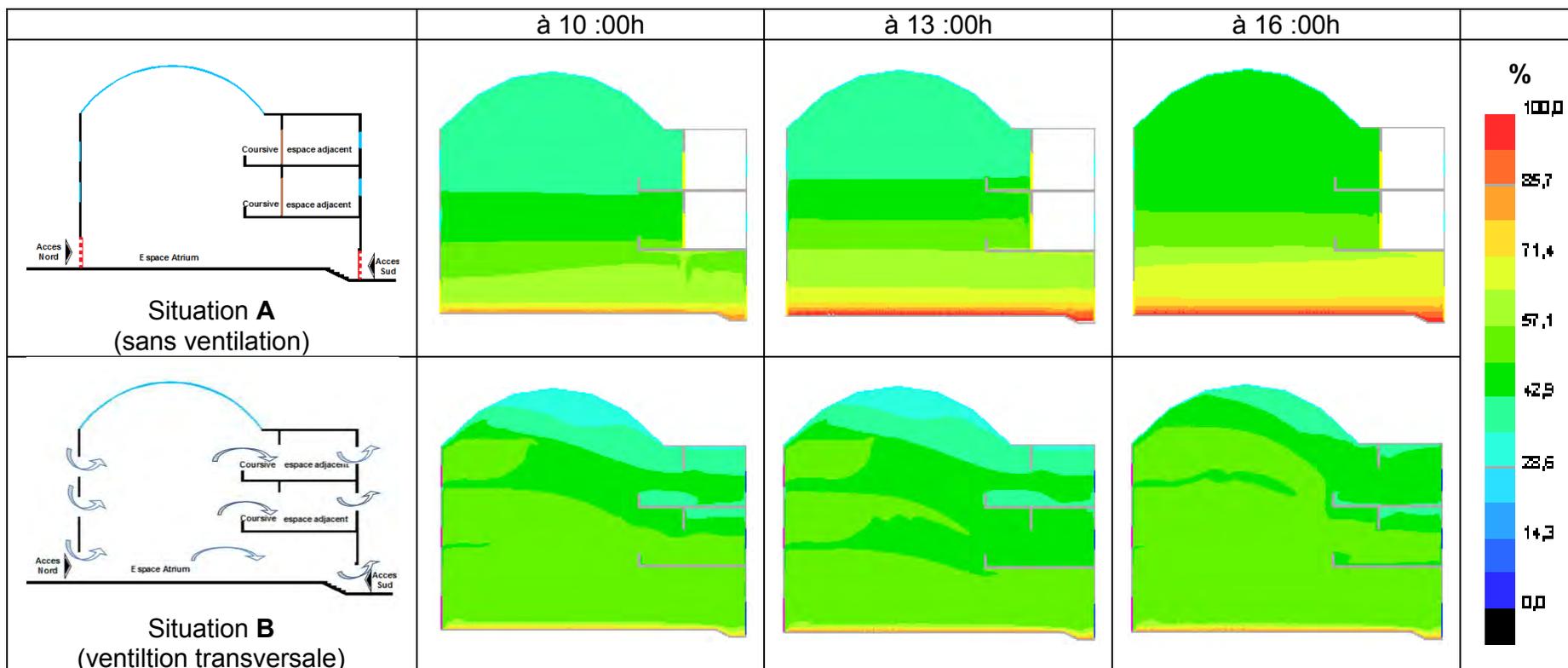


Figure V. 25 : champs des humidités relatives correspondantes aux situations A et B

[Source : auteur 2010]

On fusionnant les champs des humidités relatives (Figure V.25-26) à celles des températures de l'air pour les différentes situations, on remarque une corrélation inversée entre ces deux paramètres ou une augmentation des humidités relatives accompagne une baisse des températures de l'air interne. Dans la situation A une stratification des humidités relatives s'étale sur tout le volume de l'espace atrium, en présence d'une ventilation naturelle le gradient des humidités relatives, diminue avec des degrés qui diffèrent suivant la configuration de la ventilation naturelle.

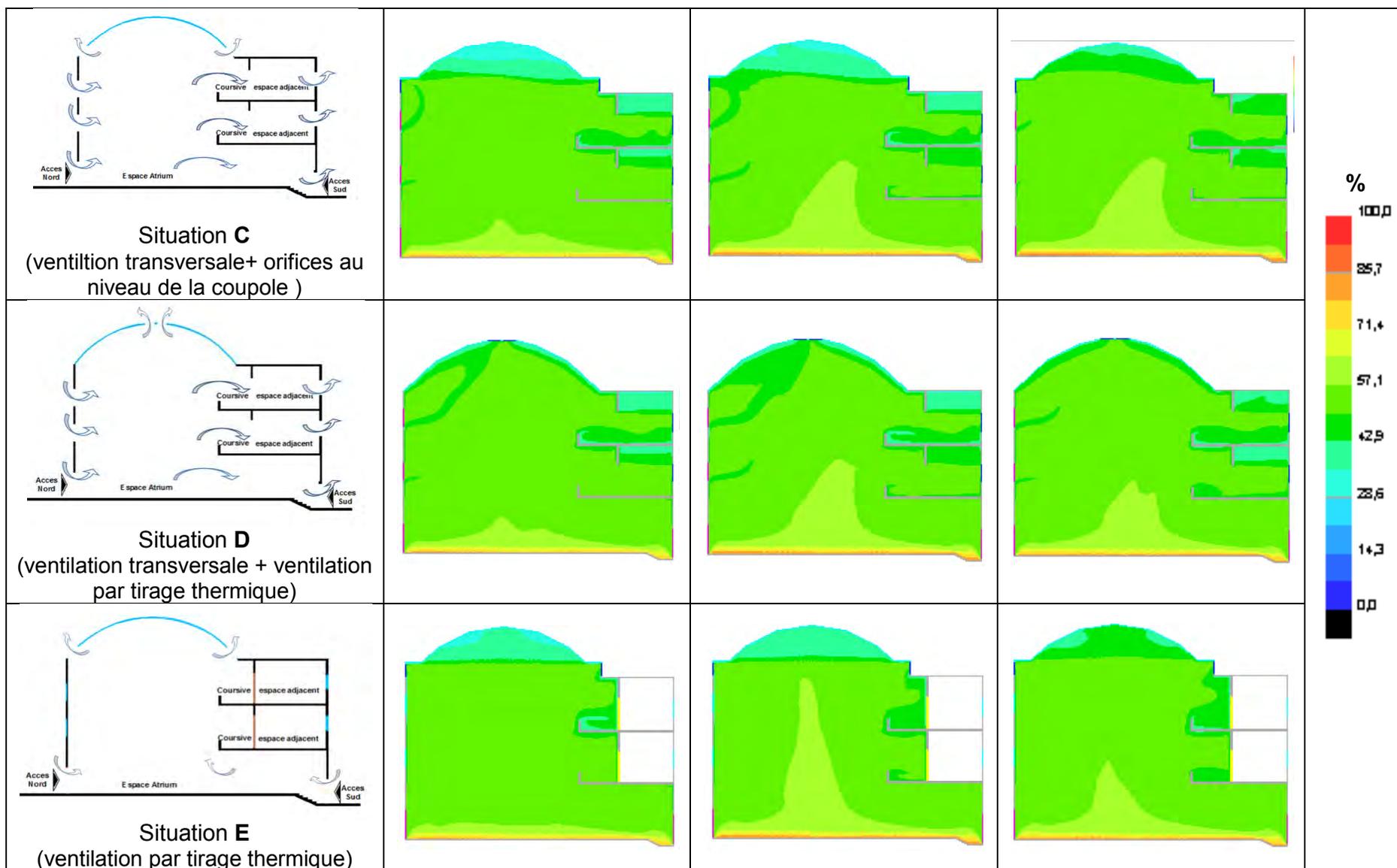


Figure V. 26 : champs des humidités relatives correspondantes aux situations C, D et E

[Source : auteur 2010]

➤ Vitesse de l'air :

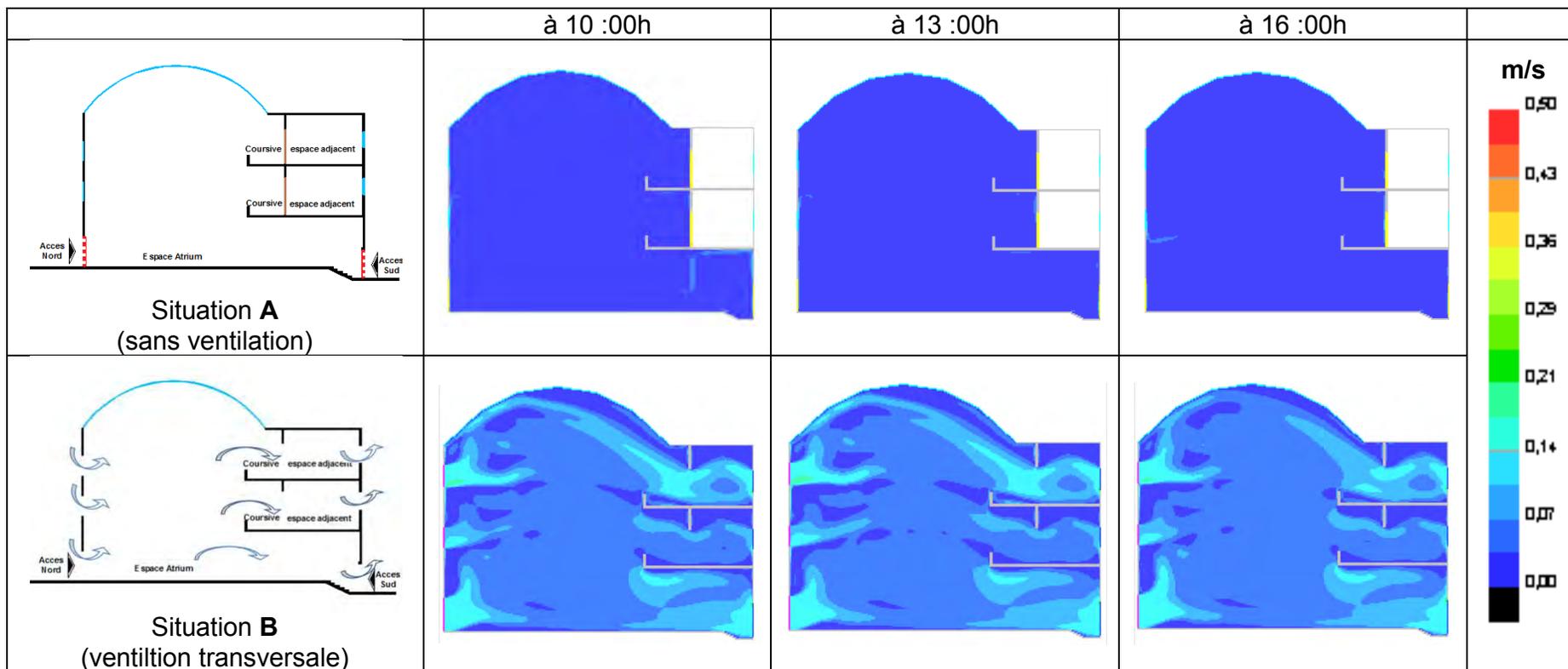


Figure V. 27 : champs des vitesses de l'air correspondantes aux situations A et B

[Source : auteur 2010]

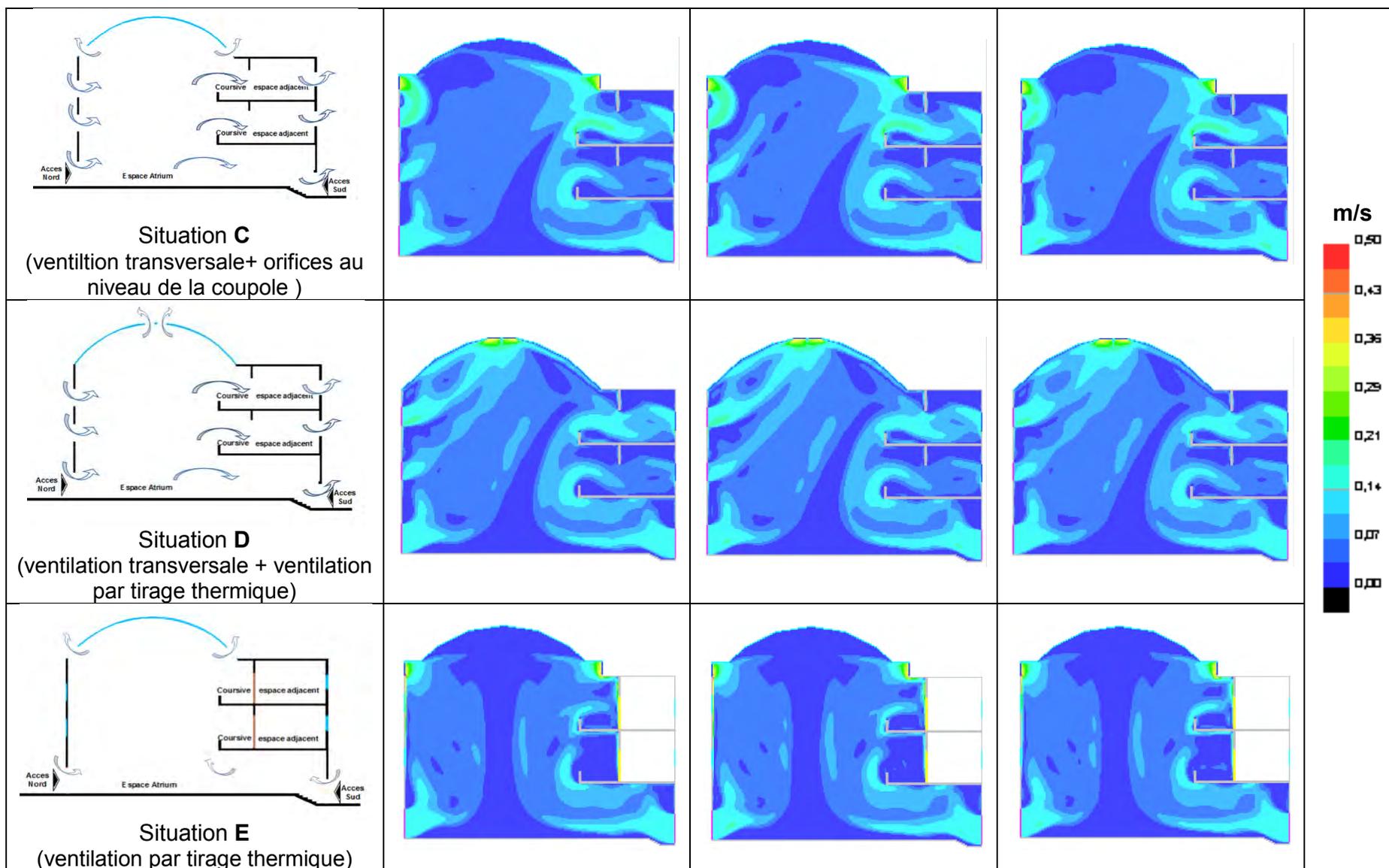


Figure V. 28 : champs des vitesses de l'air correspondantes aux situations C, D et E

[Source : auteur 2010]

Dans la situation A, l'absence d'entrée d'air implique des niveaux de vitesses négligeables, les mouvements d'air sont dus essentiellement à la convection naturelle, qui ne dépasse pas les 0,08m/s (Figure V.27). Dans le cas de la ventilation transversale (situation B), les mouvements d'air sont gérés par les entrées d'air de côté nord enregistrent des vitesses maximale au entrées et sorties d'air de 0,16m/s. le mouvement d'air est infléchi avant d'atteindre le centre de l'atrium vers la paroi ensoleillée de la coupole vitrée en créant un flux légèrement ascendant. On fusionnant le champ thermique et aéraulique, on peut remarquer l'impact de la convection naturelle renforcé par les entrées et sorties d'air sur les températures d'air. Le gradient de température est moins important. Jusqu'à la hauteur de la paroi vitrée ensoleillée, ou les couches d'air de la partie haute sont de 35 °C à 38,7°C.

L'ajout des orifices au niveau de la coupole (situation C et D) influe les mouvements d'air (Figure V.28), où on remarque des flux d'air principaux qui sont constitués par les deux ouvertures latéraux au niveau bas, qui se rejoignent au centre de l'atrium verticalement. Cela traduit le déplacement de l'air par tirage thermique de la partie basse vers la partie haute au niveau des orifices chassant ainsi l'air chaud accumulé sous la coupole. Cela est généré d'une part, par la grande différence des températures d'air entre ces deux niveaux induit par suite une différence de pression, et d'autre part, la grande hauteur entre les deux ouvertures de 11,7m et 14,9m (successivement situation C et D), créant ainsi l'effet de cheminée. Ce flux d'air vertical est dévié vers les ouvertures du côté sud en créant une recirculation inverse horizontalement localisée dans les coursives et les espace adjacent. Dans la situation D, les vitesses d'air s'accélèrent progressivement à proximité de la paroi vitrée ensoleillée passant de 0,11 à 0,36 m/s près de la sortie, qui assure un bon balayage de l'air chaud sur tout le volume de l'espace atrium en l'éjectant vers l'extérieur.

Dans la situation E, les champs des vitesses d'air illustre l'effet de cheminée crée entre les ouvertures basses et les orifices au niveau de la coupole, ou en remarque un flux d'air vertical qui se limite au niveau des sorties d'air, vue l'emplacement de ces derniers en partie basse de la coupole vitrée, des faibles vitesses d'air enregistrée dans la partie concave de la coupole, ce qui n'assure pas l'évacuation de l'air chaud qui tant a stagné dans cette espace.

➤ PPD :

Pourcentage prévisible des personnes insatisfaites (**P**redicted **P**ercentage of **D**issatisfied), qui permet d'évaluer le rapport d'occupants insatisfaits des conditions de confort thermique constatées. (Voir Annexe C)

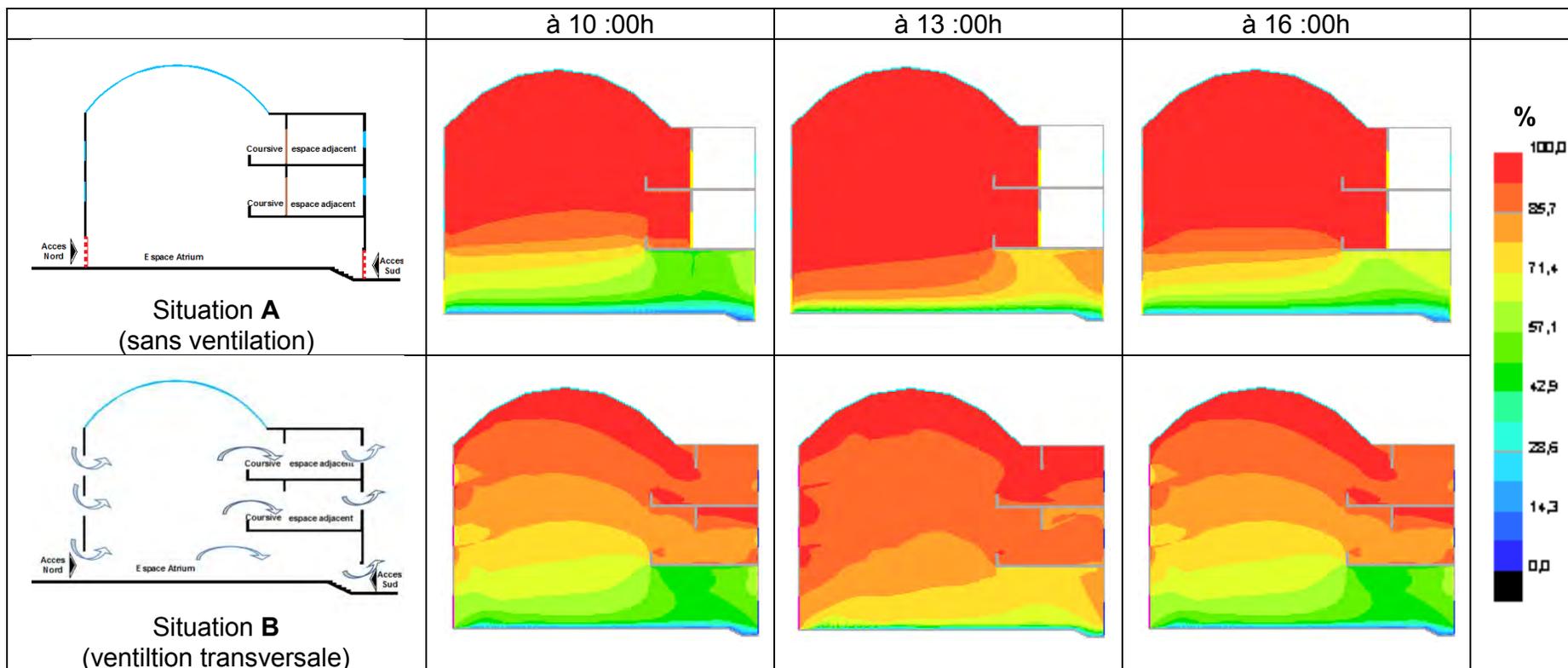


Figure V. 29 : champs des PPD correspondantes aux situations A et B

[Source : auteur 2010]

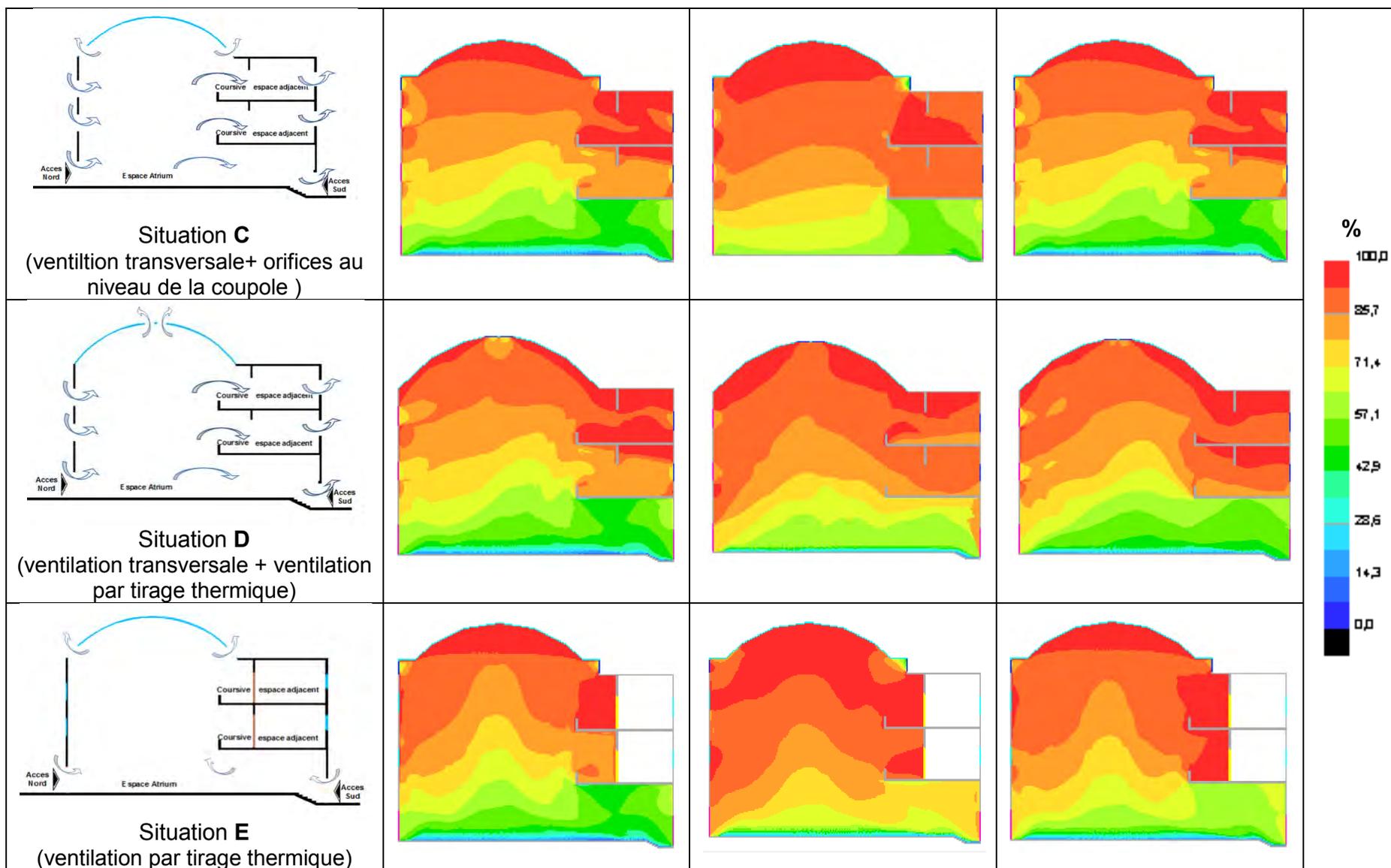


Figure V. 30 : champs des PPD correspondant aux situations C, D et E

[Source : auteur 2010]

D'après les différents champs représentatifs de PPD, et en comparaison avec les champs des différents paramètres déjà cité ci-dessus, on peut dégager que :

- ✓ Dans le cas de sans ventilation (situation A), les températures élevées enregistrées dans les niveaux supérieurs engendrent un inconfort traduit par le pourcentage élevé de PPD (Figure V.29)
- ✓ L'incorporation de la ventilation naturelle transversale (situation B), diminue la sensation d'inconfort dans l'ambiance interne, illustrée par une diminution des pourcentages de PPD. Bien que, ces pourcentages restent un peu élevés dans le niveau supérieur.
- ✓ Les meilleurs résultats de PPD, sont obtenus à travers la combinaison entre les deux types de ventilation (transversale et par tirage thermique) (situation D) (Figure V.30), réalisée par l'ajout des orifices au sommet de la coupole vitrée. Cela a permis comme on a déjà vu, une baisse des températures d'air donnant lieu à un rafraîchissement des ambiances internes et à une amélioration de confort par suite.

### V.9. Conclusion :

Ce chapitre peut être considéré comme une étape complémentaire ajoutée au travail bibliographique et d'investigation pratique. Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs séries de simulations menées dans le cadre d'une analyse de comportement thermo-aérodynamique des atriums. Ces simulations visaient à montrer l'influence de la ventilation naturelle sur le comportement thermique, afin de l'adopter comme une stratégie de rafraîchissement passive pour lutter contre les surchauffes des périodes critiques de l'été. Tout au long de cette étude entreprise, deux types d'investigation ont été effectués :

- ✓ La première consistait à simuler deux différentes configurations en ventilation naturelle avec des ouvrants au niveau de la coupole et d'autres au niveau des façades. Cela nous a permis non seulement de mesurer l'impact que peuvent avoir les paramètres étudiés sur le comportement thermique dans l'espace atrium, mais aussi d'avoir une idée plus précise sur la stratification des températures d'air. Ainsi, nous avons pu constater que les atriums sans ventilation sont les cas les plus critiques vis-à-vis du confort puisque les températures d'air enregistrées sont

excessivement élevées par rapport à la température extérieure. En plus de l'effet de serre qu'il engendre dans les espaces les plus élevés.

- ✓ Dans la deuxième nous avons soumis deux cas à une ventilation par tirage thermique en réajustant l'emplacement des ouvrants. L'objectif essentiel consistait à montrer qu'en agissant sur l'emplacement des ouvertures, on peut perfectionner l'effet rafraichissant de la ventilation naturelle et par suite améliorer le confort.

Les conclusions que nous avons pu tirer à partir de ces deux tests :

La première conclusion concerne l'effet rafraichissant de la ventilation naturelle à améliorer les températures d'air dans les atriums. Nous avons montré à travers les simulations qu'il est possible de ventiler convenablement ce type d'atrium si des ouvrants sont envisagés au niveau de l'enveloppe de l'espace atrium. Cependant ces derniers peuvent être conçus d'une façon à introduire un débit d'air assez important pour un renouvellement d'air adéquat. On a testé deux types de ventilations naturelles suivant la position des ouvrants, ventilation transversale et par tirage thermique, cette dernière a donné une baisse des températures internes qui atteint 6,32 °C à une heure critique de la journée, une diminution des températures plus que celle enregistrée avec une ventilation transversale, du fait que la forme de l'espace atrium en tant que grand volume incite un bon déplacement de l'air en fonction de son hauteur importante, et la différence de densité d'air qui est amplifiée par le surchauffe génère par la toiture vitrée.

La deuxième concerne l'impact de l'amélioration de l'ambiance thermique dans l'espace atrium sur le confort dans ses espaces adjacents, l'atrium constitue à la fois un espace intérieur pour tout le bâtiment et un environnement extérieur pour les espaces qui l'entourent, de ce fait le rafraichissement de cet environnement par un renouvellement d'air assuré par une ventilation naturelle, génère une amélioration dans les ambiances thermiques des espaces adjacents.

La troisième conclusion quant à elle est spécifique aux améliorations de l'effet rafraichissant de la ventilation par tirage thermique en fonction des positions des ouvertures, de telle façon à obtenir un maximum de débit d'air traversant le volume, le paramètre d'ordre conceptuel dégagé ainsi est la hauteur entre les orifices de sortie et des orifices d'entrée, une augmentation de ce dernier donne une augmentation des débits d'air

entrants et par suite une évacuation assez importante de l'air chaud stagné sous la toiture vitrée. Source d'inconfort dans ces grands volumes vitrés.

L'analyse fine des champs de température, d'humidité, de vitesse d'air, et de PPD, des différents cas de figure simulés, nous a permis de dégager le degré de l'effet rafraichissant de la ventilation naturelle sous différentes configurations. La combinaison entre les deux types de ventilation transversale et par tirage thermique révèle les meilleurs résultats de confort. Du fait qu'elle assure un renouvellement d'air qui englobe tout le volume interne de l'espace atrium et ses espaces adjacents luttant ainsi contre la surchauffe excessive qui tend à stagner au niveau supérieur.



# **Conclusion générale & Perspectives**

### Conclusion générale et perspectives:

Durant ces dernières années, le nombre des atriums construits a considérablement augmenté. Ces espaces qui se caractérisent par leur grande taille et par leur couverture vitrée doivent leur essor aux nombreux avantages qu'ils offrent au bâtiment. Ils permettent souvent de solutionner des problèmes d'éclairage naturel et de fonctionnement. Plus encore, l'atrium devient un élément qui participe, par son esthétique, au prestige de l'édifice. En revanche, le volume hors du commun et la transparence de ces espaces vis-à-vis de l'extérieur les rendent potentiellement soumis à des désordres du point de vue des ambiances et peuvent être source de nuisances puisque le bien-être des usagers s'en trouve affecté. Les différents travaux menés sur le thème des ambiances dans les atriums le confirment. Tous s'accordent à en faire un espace à l'environnement vulnérable et donc délicat à concevoir.

Dans tout projet architectural, la prise en compte des ambiances doit se faire dès les premières phases de la conception. C'est à ce moment, lorsque le projet commence à prendre forme, que l'architecte se doit d'intégrer dans son travail de création des préoccupations d'ambiance. Cela est le cas des ambiances thermiques où, dès le départ, l'impact des phénomènes climatiques extérieurs sur l'environnement construit doit être consciencieusement étudié de manière à ce que l'architecte aboutisse à une conception cohérente. Cela est tout particulièrement le cas des atriums qui sont fortement exposés aux variations des conditions climatiques qui souvent se traduisent par des problèmes thermiques.

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'amélioration de la conception des atriums adéquats à notre climat méditerranéen, qui se caractérise par un hiver doux et un été chaud et humide, et c'est durant cette dernière que le problème des ambiances thermiques dans les espaces atrium se démontre par des surchauffes et des stratifications thermiques incontrôlables. Source d'inconfort dans les espaces adjacents, et dans l'espace lui-même. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, celui de déterminer le comportement de l'environnement thermique des espace atrium sous nos latitude durant les deux périodes, d'une part, et de valorisé l'effet aéraulique de cheminée présent dans les grands espace tel que les atriums comme stratégie de rafraîchissement passive en période d'été par ventilation naturelle.

Dans cette optique, il nous a semblé judicieux d'explorer plus avant le comportement thermo-aéraulique des atriums pour forger l'intuition des concepteurs, en ce qui concerne l'appréciation des tendances relatives aux paramètres de conception sur le confort thermique. C'est à partir de cette analyse, en ayant mieux cerné les différents aspects qui entrent en compte dans le fonctionnement climatique d'un grand espace vitré, que nous avons envisagé d'effectuer une étude paramétrique. Celle-ci nous a permis d'aboutir à des conclusions qui pouvant servir d'aide à la conception. Essayons dans ce qui suit de rappeler les éléments qui ont ponctué cette recherche.

Au début dans le premier chapitre, il semblait nécessaire d'introduire ce travail en soulignant les conditions d'émergence des atriums comme forme architecturale à travers un bref aperçu historique. Il paraissait ensuite essentiel d'analyser les caractéristiques formelles et fonctionnelles des atriums tels qu'ils sont conçus aujourd'hui. Ce survol était donc indispensable compte tenu de la nature du sujet que nous traitons. Celui-ci s'inscrit en grande partie dans le champ de l'architecture. C'est par la suite, dans la partie état d'art, que nous basant sur une étude bibliographique, que nous nous sommes intéressé aux aspects comportementaux des atriums. D'une part, cette analyse avait comme objectifs de mieux comprendre les phénomènes physiques qui gouvernent le comportement thermo-aéraulique des atriums et de mettre en évidence les conséquences climatiques estivales. D'autre part, elle nous a permis aussi de cerner les paramètres architecturaux susceptibles d'avoir un impact sur le comportement. Toujours en nous appuyant sur des travaux existants et prévoyant d'utiliser la simulation par la suite, il était utile de s'intéresser aux outils de simulation employés dans ces espaces dont le comportement est souvent difficile à appréhender. A ce sujet, il faut souligner que la prédiction ou l'analyse de l'ambiance thermo-aéraulique d'un atrium n'est envisageable qu'en utilisant un outil de simulation lourd pouvant décrire précisément le champ thermique et les mouvements d'air.

Cette première partie théorique nous a donc permis l'accumulation des connaissances concernant la phénoménologie du comportement thermique et des mouvements d'air, les aspects de modélisation et les paramètres agissants sur le comportement. C'est une fois cette étape de travail franchie que nous pouvions alors procéder à l'analyse de comportement thermo-aéraulique qui a fait l'objet du volet pratique de la thèse.

A l'issue de ce travail bibliographique, il semblait nécessaire d'étudier de plus près le comportement d'un atrium construit. Remarquant qu'un espace largement vitré présente, d'une part, une source de chaleur appréciée durant la période hivernale, et des probables

risques thermiques pendant la saison estivale, d'autre part. La question posée consistait à savoir la repensé thermique de l'ambiance interne de ce type d'espace sous nos latitudes. C'est pour cette raison que nous avons entrepris une étude expérimentale qui est venue compléter cette analyse exploratoire sur les ambiances thermo-aérauliques des atriums. Ainsi, la campagne de mesure durant les deux périodes hivernale, et estivale, menée dans l'atrium de La Maison De La Culture de la ville de Jijel a permis, en premier lieu, de dégager qu'en hiver, l'espace atriums peut modifier positivement le bilan journalier de la température en relevant la température maximale par les apports solaires, et en maintenant constamment la température minimale, à une valeur au-dessus de la température extérieure. Elles peuvent également apporter une contribution significative à la réduction de la charge thermique pendant l'hiver. Et en deuxième lieu, de mettre en évidence les problèmes de stratification thermique et de surchauffe auxquels est soumis un atrium à certaines heures de la journée pendant la saison estivale. Ces désordres thermiques sont présents dans un volume à toiture vitrée et qui est surtout mal ventilé.

Cette constatation laisse alors présager que les conséquences climatiques seront néfastes dans un atrium plus largement vitré si celui-ci ne bénéficiait pas d'un renouvellement d'air adéquat.

Etant donné que les atriums sont soumis à des problèmes de confort thermique d'été et que les comportements aéraulique ayant une influence sur le confort en été, il était nécessaire d'étudier l'effet de la ventilation naturelle vis-à-vis du comportement. C'est donc en nous interrogeant sur la prise en compte des ambiances aérauliques dans le projet que s'est articulée le chapitre de simulation qui a pour objectif de prédire le comportement aéraulique en présence d'une ventilation naturelle, et l'effet rafraichissant de celle-ci sur les surchauffes et la stratification thermique dans l'espace atrium durant la période estivale, plusieurs cas de figure sont testées présentant deux type de ventilation transversale et verticale par effet de cheminée, avec des emplacements différents des orifices au niveau de la coupole vitrée.

L'effet rafraichissant de la ventilation naturelle à améliorer les températures d'air dans les atriums. Nous avons montré à travers les simulations qu'il est possible de ventiler convenablement ce type d'atrium si des ouvrants sont envisagés au niveau de l'enveloppe de l'espace atrium. Cependant, ces derniers peuvent être conçus d'une façon à introduire un débit d'air assez important pour un renouvellement d'air adéquat. De faite que, la forme de l'espace atrium en tant qu'un grande volume, incite un bon déplacement de l'air par

différence de densité, qui est amplifiée à cause de surchauffe génère sous la toiture vitrée. De ce fait, la ventilation par tirage thermique a donné un rafraîchissement des températures d'air plus prononcés que celle donner par ventilation transversale.

Ce rafraîchissement de l'environnement thermique de l'espace atrium a porté une amélioration du confort dans les coursives et les espaces adjacent, dans la mesure où il est considéré comme un environnement extérieur pour ces espaces.

Une améliorations de l'effet rafraîchissant de la ventilation par tirage thermique peut être réaliser par un emplacement étudiier des ouverture, de telles façons à obtenir un maximum de débit d'air traversant le volume, le paramètre d'ordre conceptuel dégagé ainsi est la hauteur entre les ouvertures d'entrées et de sorties, une augmentation de ce dernier donne une augmentation des débits d'air entrant, et par suite une évacuation assez importante de l'air chaud stagné sous la toiture vitrée.

Par ailleurs, on ne saurait restreindre le problème de conception des espaces atriums à la seule question du confort thermo-aéraulique. En effet, l'intégration de l'ensemble des aspects suivants semble importante :

1. Comportement thermique et aéraulique
2. Consommation énergétique
3. Eclairage naturel
4. Qualité acoustique
5. Sécurité des biens et des personnes
6. Stratégies des contrôles pour la climatisation et les protections solaires
7. Identité architecturale

Un outil de conception traitent l'ensemble de ces points serait d'une grande aide aux concepteurs. Cet outil pourrait prendre deux formes non exclusives :

- ✓ Un guide ou une « check-list » qui organiserait les connaissances existantes de façon pratique et méthodologique, afin que l'on ne commette pas d'impasse lors du processus de conception et que les technologies adéquates soient utilisées.

- ✓ Un outil de modélisation simple ou des abaques, fondés sur les résultats d'analyse des paramètres existants pour chacune des typologies.

Parmi les difficultés majeures à contourner dans l'élaboration de tels outils, on pourra noter les interactions entre différents aspects, abordés le plus souvent à l'heure actuelle de façon indépendante, notamment :

- **Acoustique et aéraulique** : transmission du bruit en milieu avec la ventilation naturelle ou bruit du aux ventilateurs.
- **Sécurité incendie et aéraulique** : la sécurité incendie peut être un frein à la ventilation naturelle par le cloisonnement aéraulique de l'espace-serre.
- **Thermique et éclairagisme** : la recherche de lumière naturelle peut être en contradiction avec la limitation des apports solaires pour le confort thermique. Les protections solaires permettent à la fois de gérer les surchauffes et les problèmes d'éblouissement.



# Bibliographie

**Bibliographie :****Livre :**

1. **B. GIVONI.**(1998) « *Climate considerations in building and urban design* ».Edition John Willy and sons
2. **B. GIVONI.** (1978). « *L'Homme, L'Architecture et le Climat* ». édition : Edition Le Moniteur, paris,
3. **B. GIVONI.** (1994) « *Passive and low energy cooling of building* ». Edition John Willy and sons.
4. **BEDNAR, M.J.** (1986) « *The new atrium* ».McGraw-Hill Inc, New York (USA).
5. **CAPDEROU Michel.** (1984) « *Atlas Solaire De L'Algérie* », tome1, Edition O.P.U, Alger.
6. **CAPDEROU Michel.** (1986) « *Atlas Solaire De L'Algérie* », tome 3, Edition O.P.U, Alger.
7. **CAROLYN ALLEN.** (1984) « *AIRGLOSS : Air Infiltration Glossary (English-French /Français – Anglais) Supplement* », Air Infiltration Centre, Old Bracknell Lane, Grest Britain.
8. **GEIST J.F.** (1989) « *Le passage, un type architectural du XIXème siècle* », Ed Pierre Mardaga, Edition française traduite de l'Allemand par Brausch M, Paris, 623 p
9. **J.L. IZARD.** (1993) « *Architecture d'été: Construire pour le confort d'été* ».Edition Edisud, Aix-en-provence.
10. **MARK LIMB.** (1992) « *Air Infiltration and Ventilation Glossary* », AIVC Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick Science Park, Great Britain.
11. **M.H. AHMED, M.T.M. RASDI.** (2002) « *Design Principles of Atrium Buildings for the Tropics* ».Penerbit UTM, Malaysia.
12. **HAZIM.B AWBI.** (2003) « *Ventilation of Buildings (Second edition)* ».Spon Press, London.

13. **HEISELBERG. P, MURAKAMI. S, ROULET.C. A.** (1998) « *Ventilation of a Large Spaces in Buildings: Analysis and Prediction Techniques* ». IEA (energy conservation in buildings and community systems), Kolding Trykcenter A/S, Denmark,
14. **HIX J.** (1974) « *The Glass House* ». Great Britain: Phaidon Press Ltd, London.
15. **LIEBARD.A, DEHERDE.A.** (2005) « *Traite D'architecture et D'urbanisme Bioclimatiques* ». le Moniteur, paris.
16. **MAZRIA .E.** (1981) « *Le Guide de L'énergie Solaire Passive* ». édition Parenthèse, Traduction BAZAN P., illustration BALL R, Paris.
17. **P.LAVIGNE et coll.** (1994) « *Architecture Climatique : Une Contribution au Développement Durable* ». Édition Edissud. Tome1.
18. **P.LAVIGNE et coll.** (1994) « *Architecture Climatique. Une Contribution au Développement Durable* ».Édition Edissud. tome 2.
19. (1993) « *Recommandations architecturales* ». Edition Enag.
20. **SAXON R.** (1983) « *Atrium Buildings: Development and Design* ». Great Britain: The Architectural Press Ltd, London.
21. **U.R.E. Bâtiment.** (1999) « *Guide d'Audit Energétique : 4.VENTILATION ET INFILTRATIONS* ».
22. **V. Olgay.** (1962) « *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism* ». Edition Princeton university press. 1962.

#### **Mémoires et thèses :**

1. **BADECHE MOUNIRA.** (2008) « *Impact de la loggia vitrée sur le confort thermique, Dans la région de Constantine* », Mémoire de Magistère, option architecture Bioclimatique, département d'architecture, université de Constantine.
2. **BELMAAZIZ Mohamed.** (2003) « *Les Ambiances Thermo-aérauliques dans les Atriums Linéaires : Contribution à la constitution de règles expertes utilisables dans la conception du projet* ». Thèse de Doctorat, Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy.

3. **BOUCHAHM Yasmina.** (2004) « *Investigation sur la performance thermique du capteur à vent pour le rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides, cas 'Ouargla' »*, Thèse de Doctorat, université de Constantine.
4. **CORDIER Nicolas.** (2007) « *Développement et Evaluation de Stratégies de Contrôles de Ventilation Appliquées aux Locaux de Grandes Dimensions »*.Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MEGA.
5. **CROZET P.** (1981) « *Etude du Comportement Thermique des Galeries Couvertes par Simulation en Régime Varié avec prise en compte de la stratification de l'air »*. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Université de Paris VII, Paris.
6. **DJOUIMAA Ahmed.** (2008) « *Réalisation et Vérification de la Performance Thermique d'une Tour a Vent pour un Rafraîchissement Passif dans les Régions Chaudes et Arides. Cas de Hassi Messaoud*», Mémoire de Magistère, option architecture Bioclimatique, département d'architecture, université de Constantine.
7. **HUMBERT. M.** (2002) « *Impact Des Paramètre De Conception Sur Le Confort D'été Des Grands Espaces-Serres »*. Thèse de doctorat, Laboratoire Des Sciences De L'habitat (LASH) URA 1652 CNRS de l'Ecole Nationale Des Travaux Publics De L'état (Vaulx-en-Velin), France.
8. **INARD C.** (1988) « *Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local : Etudes expérimentales en chambre climatique »*. Thèse de L'INSA de Lyon, N° d'Ordre 88 ISAL 0042, Lyon.
9. **JOHN ASHLEY MABB.**(2001) « *Modification Of Atrium Design To Improve Thermal And Daylighting Performance, Centre for Medical, Health and Environmental Physics, School of Physical and Chemical Sciences, Queensland University of Technology in partial fulfillment of the requirements of the degree of Masters of Applied Science.*
10. **KLEIVEN Tommy.** (2003) « *Natural Ventilation in Buildings: Architectural concepts, consequences and possibilities »*.These de doctorat, Faculty of Architecture and Fine Art, Department of Architectural Design, History and Technology, Norwegian University.
11. **Maxime TROCMÉ.** (2009) « *Aide aux choix de conception de bâtiment économes en énergie »*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.

12. **MIGUET F.** (2000) « *Paramètres Physiques des Ambiances Architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain* ». Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.
13. **MOUJALLED Bassam.** (2007) « *modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés* ». Thèse de doctorat, institut des sciences appliquées de Lyon, France.
14. **PFROMMER P.** (1995) « *Thermal Modeling of Highly Glazed Spaces* ». Ph-D thesis, Monfort University, Leicester.
15. **SIRET D.** (1997) « *Proposition pour une Approche Déclarative des Ambiances dans le Projet Architectural: Application à l'ensoleillement* ». Thèse de doctorat, Université de Nantes.
16. **VINET J.** (2000) « *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain, caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espace extérieurs* ». Thèse de doctorat, Université de Nantes.
17. **VOELTZEL A.** (1999) « *Modélisation du comportement thermo-aéraulique des grands volumes vitrés en régime dynamique* ». Thèse de l'ENTPE.
18. **WALL M.** (1996) « *Climate and energy use in glazed spaces* ». Ph-D thesis, University of Lund, Lund Institute of Technology, Department of Building Science.

#### **Revue et articles :**

1. **Abd.Halid Abdullah, QinglinMeng, LihuaZhao, FanWang.**(2008) « *Field study on indoor thermal environment in an atrium in tropical climates* ». Building and Environment 44, pp431– 436
2. **ALDAWOUD .A, CLARK .R.** (2008) « *Comparative Analysis of Energy Performance Between Courtyard and Atrium in Buildings* ». Energy and Buildings 40, pp209–214.
3. **ANDERSEN K.T.** (1995) « *Theoretical Considerations on Natural Ventilation by Thermal Buoyancy* ». ASHRAE Transactions, Vol 101, Part 2, pp 1103-1117.
4. **ATIF MR.** (1993) « *Atrium Buildings: amenities, energy costs and environment* ». Construction Canada; 36(1):43–7.

5. **ATIF M.R., CLARIDGE D.E., BOYER L.L. and DEGELMAN, L.O.** (1995) « *Atrium Buildings: Thermal Performance and Climatic Factors* ». ASHRAE Transactions Research, ASHRAE Winter Meeting. Vol 101, Part 1, Chicago, IL, pp. 454-460.
6. **ARVIND Devikar.** (2001) « *Energy Consumption in Building with Atria In Composite Climate* ».Senior Architect VIII .Central PWD, New Delhi India, pp. 1-21.
7. **AYOOB .A.N, IZARD J.L.**(1994) « *Study of Comfort in Atrium Design* ».Renewable Energy, Vol.5, Part II, pp. 1002-1005.
8. **BAKER Nick.** (1992) « *Atrium Design Guidelines* ». In Building 2000, Vol1, Dordrecht (NL): Kluwer Academic publishers.
9. **BRYN Y.** (1995) « *Atrium Buildings from the Perspective of Function:indoor Air Quality and Energy Use* ».ASHRAE Transactions. Vol 101, Part 2, pp. 829-840.
10. **DEMERS, POTVIN.** (2004) « *L'atrium : Espace Bioclimatique Viable en Milieu Nordique* ».Esquisses, bulletin d'information de l'Ordre des Architectes du Québec, volume 15, numéro 4, Novembre-janvier.
11. **DORER V. and WEBER A.**(1999) « *Air Contaminant and Heat Transport Models: Intergration and Application* ». Energy and Buildings. Vol 3, N° 1, pp. 97-104.
12. **FOSTER M.P. and DOWN M.P.**(1987) « *Ventilation of Livestock Buildings by Natural Ventilation* ». A review. Journal of Agricultural Engineering 37, pp. 1-13.
13. **ÖzgürGöçer, AslihanTavil, and ErtanÖzkan.**(2006) « *Thermal Performance Simulation of an Atrium Building* ». Proceedings of eSim 2006 Building Performance Simulation Conference Faculty of Architecture, Landscape, and Design, University of Toronto, Canada, May 4 & 5.
14. **GROLEAU D. et MARENNE C.**(1992) « *Evaluation Géométrique Des Facteurs De Forme Dans Une Scene Avec Prise En Compte Des Masques et de L'ensoleillement* ».In : journée d'étude SFT, sur les méthodes de calcul des échanges radiatifs, Paris, 25 mars, 14 p.
15. **GROLEAU D., MARENNE C. ET LEFEUVRE M.** (1994) « *Simulation Des Ecoulements D'air Dans Les Espaces Vitres Ensoleilles : Le cas d'une rue couverte* ».In: Proceedings European Conference on Performance and Indoor Climate in Buildings,.Lyon, France, 24-26 Novembre, pp. 161 - 166.
16. **HALID. A. A, MENG. Q, ZHAO. L, WANG .F.**(2009) « *Field Study on Indoor Thermal Environment in an Atrium in Tropical Climates* ».Building and Environment, Volume 44, Issue 2, February, Pages 431-436.
17. **IOANMoga, LIGIAMoga.** (2009) « *The Thermal Performance of the Building Envelope Elements Having Glazing Surfaces* ».Building simulation.

18. **IZARD J.L. AYOUB A. et BRASSELET J.P.** (1994) « *Le Confort D'été Dans Les Atriums : recherche de mise au point d'outils simplifiés de prédimensionnement* ». Rapport ADEME, décembre.
19. **IZARD J.L., BELMAAZIZ M., FRUSTAS F. et MAZOUÉ F.**(1997) « *Le Confort D'été Dans Les Atriums* ». Rapport de recherche du Laboratoire ABC, OASIS, ADEME, juin, 110 p.
20. **IZARD J.L, BELMAAZIZ .M, DESTOBBELEIRE .G, DEPECKER .P.**(1998)« *Le Confort Thermique D'été Dans Les Atriums: Comment prédire le comportement thermique de ces espaces architecturaux?* », EPIC 98, 2ème conférence Européenne Performance énergétique et Qualité des Ambiances dans le bâtiment, Lyon, 19-21 Novembre.
21. **JAYESH.H, S. FARUQ, PE, P.R. RITTELMANN, FAIA.**(2003)« *Atrium Design Strategies for Daylighting and Natural Ventilation* ».USGBC: International Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, November 12 – 14.
22. **JOANNE M. HOLFORD, GARY R. HUNT.** (2003) « *Fundamental atrium design for natural ventilation* ». Building and Environment 38, pp409 – 426.
23. **JONES J.R. and LUTHER M.B.** (1993) « *A Summary of Analytical Methods And Case Study Monitoring Of Atria* ».ASHRAE Transactions, pp. 1070-1081.
24. **JOSEPH M. HORAN, DONAL P. FINN.**(2008)« *Sensitivity Of Air Change Rates In A Naturally Ventilated Atrium Space Subject To Variations In External Wind Speed And Direction* ». Energy and Buildings 40, pp 1577–1585.
25. **JP BRASSELET.** « *Confort D'été, Rafrachissement ou Climatisation Des Bâtiments* » (logiciel de simulation thermique TAS et méthode opti clim).
26. **JULURIA Y.** (1980) « *Natural Convection Heat and Mass Transfer* ».Pergamon Press, England. Chapitre 6: Natural Convection in Stratified Media, p173-208.
27. **KAINLAURI E.O.** (1987) « *Interfacing of Daylighting, Artificial Lighting and Solar Gains in Buildings with Atriums* ». In: Proceedings of the 3rd International Congress on Building Energy Management, IV Solar Energy use and Daylighting. Lausanne, Switzerland, 28 Septembre - 20 Octobre, pp. 346-353.
28. **KATO S., MURAKAMI S., SYOYA S., HANYU F. and ZENG J.**(1995) « *CFD Analysis of Flow and Temperature Fields in Atrium With Ceiling Height Of 130 m* ».ASHRAE Transactions, Vol 101, Part 2, pp. 1144-1157.
29. **LAOUADI A., ATIF M.R.** (1999) « *Comparison between Computed and Field Measured Thermal Parameters in an Atrium Building* ».Building and Environment, v. 34, no. 2, Mar, pp. 129-138.

30. **LAOUADI A, ATIF MR, GALASIU A.** (2000) « *Development of Design Tools of Atrium Skylights in Canadian Climates, Part 3: thermal and energy performance* ». Report B-3204.3, NRCC, Canada.
31. **LAOUADI A., ATIF M.R. GALASIU A.** (2002) « *Towards Developing Skylight Design Tools for Thermal And Energy Performance of Atriums In Cold Climates* ». Building and Environment, 37 (1289-136).
32. **LOMAS K.L. and EPEL, H.** (1994) « *Atrium studies technical review: Final report. Environmental computer aided design and performance* ». (ECADAP) Group School of Built Environment, ETSU, Cambridge.
33. **MOHIT Mehta.** (2005) « *Natural Ventilation Analyses of an Office Building with Open Atrium* ». Building simulation.
34. **NICOL J.F. et HUMPHREY M.A (2002)** « *Adaptive Thermal Comfort And Sustainable Thermal Standards For Buildings* ». Energy and Buildings, vol. 34,n°6, pp. 563-572
35. **PAN. Y, Y. Li, Z. HUANG, G. WU.**(2008) « *Study On Simulation Methods Of Atrium Building Cooling Load In Hot-And-Humid Regions* ».Energy and Buildings, doi:10.1016/j.enbuild.2010.04.008.
36. **ROBERTSON, G.** (1991) « *Atria-Temperate Climate Responses* » In: Proceedings of the 9th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 91). Seville, Spain, September, pp. 251-256.
37. **SCHILD P.**(1996) « *CFD Analyse of an Atrium Using a Conjugate Heat Transfer Model Incorporating Long-Wave and Solar Radiation* ». In: Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 96). Yokohama, Japon, le 17 July, pp. 185-194.
38. **SCUDO G., BOVERI P. and VILLANI P.** (1993) « *Urban transparency: the glazed court in padanian towns* ».In: Proceedings 3rd European Conference on Architecture, Florence, Italy, 17-21 May, pp. 130-133.
39. **S. SHARPLES and R. BENSALÉM.** (2001) « *Airflow in Courtyard and Atrium Buildings in the Urban Environment: A Wind Tunnel Study* ».Solar Energy Vol. 70, No. 3, pp. 237–244.
40. **VOELTZEL A. CARRIE F.R. and GUARRACINO G.** (2001) « *Thermal and Ventilation Modeling of Large Highly-Glazed Spaces* ». Energy and Buildings. N° 33, pp. 121-132.
41. **WALL M, A.** (1995) « *design tool for glazed spaces* ».Par I: Description. ASHRAE Transactions. Vol 101, Part 2.

42. **WANG. X, HUANG. C, CAO. W.** (2009) « *Mathematical Modeling and Experimental Study on Vertical Temperature Distribution of Hybrid Ventilation in an Atrium Building* ». *Energy and Buildings* 41, pp 907–914.
43. **WANG. X, HUANG. C, CAO. W.** (2009) « *Mathematical Modeling and Experimental Study on Vertical Temperature Distribution of Hybrid Ventilation in an Atrium Building* ». *Energy and Buildings* 41, pp 907–914.
44. **YOSHINO Hiroshi, ITOKuniaki, AOZASA Ken.** (1995) « *Trends in Thermal Environmental Design of Atrium Buildings in Japan* ». *ASHARE Transaction*, vol 101 n°2, p858-865.

#### **Documents divers :**

- CNERIB. (2006) C 3-2, Document technique règlementaire « réglementation thermique des bâtiments d'habitation – règle de calcul des déperditions calorifique, fascicule 1 », édition CNERIB, Alger.
- CNERIB. (2006) C 3-31, Document technique règlementaire « ventilation naturelle – locaux à usage d'habitation », édition CNERIB, Alger.
- Données météorologique de la ville de Jijel pour la période 1999-2008, station météo de Jijel aéroport ; latitude 36°48'N– longitude 5°53'E.
- EDSL TAS program version 9.1.4.2 : logiciel de simulation
- Google Earth (2009-2010), « logiciel de recherche géographique »
- Systran professionnel v 6 : logiciel de traduction Français - Anglais / English-French

#### **Sites internet:**

1. <http://www.ademe.fr>.
2. <http://mrw.wallonie.be/energieplus>
3. [http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page\\_16218.htm](http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_16218.htm)
4. <http://www.outilssolaires.com/Archi/prin-ventilation2.htm>
5. <http://espace.lecolededesign.com/2009/06/la-ventilation-naturelle/>
6. <http://www.marseille.archi.fr/ABC/Atriums.htm>
7. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/sc/ctus-n47.html>
8. <http://www.umc.dz>
9. <http://www.souchier.fr/Atriums.html>
10. <http://books.google.fr/>: CHRISTIAN SCHITTICH : Construire En Verre [en ligne]
11. <http://.sun-swes.com/>: Sun-Swces. Design Guidelines for Solar Buildings System. [en ligne]

12. <http://www.sciencedirect.com/>
13. <http://www.archi.fr/RECHERCHE/annuaireg/pdf/ABC.html>
14. <http://www.wikipedia.com>
15. <http://www.ashrae.org>
16. <http://download.reedexpo.fr/salons/interclima/conferences/Le-lycee-Kyoto.pdf>
17. <http://www.ibgebim.be/soussites/energieplus/fr/CDRom/Ventilation/etudescas.htm>
18. <http://perso.orange.fr>
19. UCL-architecture et climat.2000.[Enligne]www energie2.arch.vcl.ac.be.données%20
20. <http://www.colt-france.fr/les-produits-et-les-systemes-colt/ventilation-naturelle/>
21. [http://www.batimentenergie.org/fileadmin/user\\_upload/climhybu/Climhybu\\_annexe1pdf](http://www.batimentenergie.org/fileadmin/user_upload/climhybu/Climhybu_annexe1pdf)
22. <http://cat.inist.fr>
23. [http://www.thermistop.com/files/Telechargements/Fournisseurs/4/Brochure\\_Ventilation\\_naturelle\\_F-F.pdf](http://www.thermistop.com/files/Telechargements/Fournisseurs/4/Brochure_Ventilation_naturelle_F-F.pdf)
24. [www.batir-sain.com](http://www.batir-sain.com)
25. <http://webzine.cstb.fr>.
26. [www.xella.be/html/bel/fr](http://www.xella.be/html/bel/fr)
27. [www.sun-swes.com](http://www.sun-swes.com)
28. [www.edsl.com](http://www.edsl.com)



# Annexes



# Annexe A

**Données météorologiques**

**Tableau A. 1 : Données météorologiques de la ville de Jijel (PERIODE de 1999-2008)**

[Source: ONM Jijel 2009, réadapté par auteur]

		Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Températures	Températures Moy. max, °c	16,2	16,4	18,9	20,9	24,0	28,2	30,8	31,8	28,8	26,5	20,4	17,4
	Températures Moy.min, °c	6,2	6,4	8,3	10,2	13,6	17,0	19,6	20,6	18,4	14,2	10,8	7,9
	Températures Moy. annuelles, °c	11,2	11,6	13,5	16,0	19,1	23,0	25,6	26,4	23,7	21,1	15,6	12,5
Humidité	Humidité relative Moy.max, %	92,8	92,7	92,7	93,2	93,3	92,2	90,4	89,1	91,6	92	91,6	91,7
	Humidité relative Moy.min, %	56,8	54,1	54,4	52,8	56,4	51,4	48,8	48	51,7	51,1	54,8	55,9
	Humidité relative annuelle, %	78,4	77,1	75,9	75,7	77,3	73,3	71,3	70,5	75	73,6	75,9	77,3
vent	Vent moy (m/s)	2.4	2.4	2.4	2.6	2,3	2,2	2,2	2,0	2,2	2,1	2,4	2,7
Précipitation	Précipitations, mm	154,9	99,5	81,8	63,8	51,6	11,6	3,2	16,1	60,4	56,2	160,0	200,6

**Tableau A. 2 : Données de la station météo correspondantes aux jours de l'investigation**

[Source: ONM Jijel 2009-2010, réadapté par auteur]

Jours	Heures	Températures (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse de vent (m/s)	Direction de vent (°)
20 juillet 2009	00 :00	21,5	85	0	0
	1 :00	22	85	0	0
	2 :00	22,1	87	0	0
	3 :00	22,06	87	0	0
	4 :00	22,03	81	0	0
	5 :00	22	81	0	0
	6 :00	23,8	81	0	0
	7 :00	25,6	66	3	320
	8 :00	27,5	66	3	320
	9 :00	28,2	66	3	320
	10 :00	28,8	54	4	360
11 :00	29,5	54	4	360	

	12 :00	29,2	54	4	360
	13 :00	28,8	64	3	320
	14 :00	28,5	64	3	320
	15 :00	28	64	3	320
	16 :00	27,5	69	2	280
	17 :00	28,5	69	2	280
	18 :00	27,2	69	2	280
	19 :00	25,8	84	0	0
	20 :00	24,5	84	0	0
	21 :00	24,53	84	0	0
	22 :00	24,56	86	0	0
	23 :00	24,6	86	0	0
21 juillet 2009	00 :00	24,34	89	0	0
	1 :00	24,08	89	0	0
	2 :00	23,8	89	0	0
	3 :00	23,57	89	0	0
	4 :00	23,34	89	0	0
	5 :00	23,1	89	0	0
	6 :00	25,3	89	0	0
	7 :00	27,5	60	3	300
	8 :00	29,7	60	3	300
	9 :00	30	60	3	300
	10 :00	30,3	62	4	340
	11 :00	30,5	62	4	340
	12 :00	31	62	4	340
	13 :00	31,5	52	4	340
	14 :00	32	52	4	340
	15 :00	31,5	52	4	340
	16 :00	30,9	55	2	360
	17 :00	30,4	55	2	360
	18 :00	29,47	55	2	360
	19 :00	28	63	0	0
	20 :00	27,6	63	0	0
21 :00	26,5	63	0	0	

	22 :00	25,7	89	0	0
	23 :00	24,6	89	0	0
22 juillet 2009	00 :00	30,94	60	0	0
	1 :00	29,88	52	3	180
	2 :00	28,8	52	3	180
	3 :00	28,54	52	3	180
	4 :00	28,28	48	0	0
	5 :00	28	48	0	0
	6 :00	29,65	48	0	0
	7 :00	31,3	52	5	340
	8 :00	33	52	5	340
	9 :00	35,2	52	5	340
	10 :00	37,4	26	4	340
	11 :00	39,6	26	4	340
	12 :00	40,4	26	4	340
	13 :00	41,2	22	7	360
	14 :00	42	22	7	360
	15 :00	40,5	22	7	360
	16 :00	39,1	37	4	260
	17 :00	37,7	37	4	260
	18 :00	34	37	4	260
	19 :00	30,3	80	2	120
	20 :00	26,6	80	2	120
	21 :00	28,4	80	2	120
	22 :00	30,2	80	0	0
23 :00	32	82	0	0	
18 Août 2009	00 :00	24,2	88	0	0
	1 :00	24	89	0	0
	2 :00	23,5	90	0	0
	3 :00	23	91	0	0
	4 :00	22,7	92	0	0
	5 :00	22,1	94	0	0
	6 :00	22,5	80	0	0
	7 :00	28	70	4	0

	8 :00	29,5	63	5	360
	9 :00	30	65	5	340
	10 :00	30,2	64	6	360
	11 :00	30,2	70	6	20
	12 :00	31	72	6	40
	13 :00	31,5	69	6	20
	14 :00	31,1	70	8	40
	15 :00	31,1	65	7	20
	16 :00	31,2	58	0	40
	17 :00	31	64	0	0
	18 :00	30	70	0	0
	19 :00	28,9	75	0	0
	20 :00	27,2	82	0	0
	21 :00	26	85	0	0
	22 :00	25,1	88	0	0
23 :00	24,1	93	0	0	
19 Août 2009	00 :00	24,1	93	0	0
	1 :00	24,8	82	0	0
	2 :00	25,6	71	2	120
	3 :00	26,7	65	0	0
	4 :00	27,5	60	0	0
	5 :00	28,5	54	3	120
	6 :00	33	44	3	100
	7 :00	34,6	39	4	100
	8 :00	36,7	47	4	60
	9 :00	37,5	43	5	60
	10 :00	38,2	34	7	20
	11 :00	36,1	42	7	20
	12 :00	39,5	26	8	100
	13 :00	34,5	47	12	20
	14 :00	34,7	36	8	360
15 :00	30,4	47	4	100	
16 :00	31	51	3	360	
17 :00	28	63	9	120	

	18 :00	27,1	62	0	0
	19 :00	26,7	61,5	0	0
	20 :00	26,4	61	5	160
	21 :00	25	62	0	0
	22 :00	24	66	0	0
	23 :00	23,6	69	0	0
20 Août 2009	00 :00	23,6	70	0	0
	1 :00	23	72	0	0
	2 :00	22,5	73	0	0
	3 :00	23	71	0	0
	4 :00	23,5	69	0	0
	5 :00	24	67	0	0
	6 :00	25,5	67	0	0
	7 :00	28,7	58	0	0
	8 :00	30	62	3	320
	9 :00	30,2	56	5	340
	10 :00	30,7	50	5	340
	11 :00	30,2	64	5	340
	12 :00	30,5	59	6	340
	13 :00	30,3	69	5	320
	14 :00	30	71	5	360
	15 :00	28,3	81	5	360
	16 :00	28,6	79	4	360
	17 :00	28	81	3	360
	18 :00	27,2	83	0	0
	19 :00	26,3	85	0	0
	20 :00	25,7	86	0	0
	21 :00	25,2	85	0	0
	22 :00	24,8	86	0	0
23 :00	24,2	87	0	0	
7 Février 2010	00 :00	12,5	67	0	0
	1 :00	12,5	66	2	220
	2 :00	12,5	66	5	280
	3 :00	12,4	65	3	240

	4 :00	11,5	70	0	0	
	5 :00	11,4	69	0	0	
	6 :00	11,5	70	2	240	
	7 :00	10,5	73	6	260	
	8 :00	14,3	67	7	260	
	9 :00	15,1	67	8	260	
	10 :00	16,0	70	10	240	
	11 :00	15,8	73	9	260	
	12 :00	16,0	66	9	300	
	13 :00	16,5	68	8	300	
	14 :00	15,8	71	7	300	
	15 :00	15,8	68	7	320	
	16 :00	15,0	77	6	300	
	17 :00	13,5	78	4	320	
	18 :00	14,5	75	2	200	
	19 :00	12,0	80	3	200	
	20 :00	11,5	84	8	180	
	21 :00	11,1	86	0	0	
	22 :00	10,5	88	0	0	
	23 :00	10,2	87	0	0	
	8 Février 2010	00 :00	10,0	87	0	0
		1 :00	10,0	87	0	0
		2 :00	9,5	87	0	0
3 :00		8,7	87	0	0	
4 :00		8,3	86	0	0	
5 :00		9,0	80	3	140	
6 :00		8,5	83	0	0	
7 :00		8,0	86	0	0	
8 :00		8,4	85	0	0	
9 :00		10,5	79	0	0	
10 :00		12,5	74	0	0	
11 :00		15,0	67	0	0	
12 :00		14,5	71	3	20	
13 :00		15,0	64	0	0	

	14 :00	14,7	69	0	0
	15 :00	15,2	69	0	0
	16 :00	15,0	74	0	0
	17 :00	14,0	80	0	0
	18 :00	13,0	80	0	0
	19 :00	13,8	80	0	0
	20 :00	12,5	94	0	0
	21 :00	12,5	94	0	0
	22 :00	12,0	94	0	0
	23 :00	12,3	88	0	0
9 Février 2010	00 :00	12,1	91	0	0
	1 :00	12,4	90	0	0
	2 :00	12,0	90	0	0
	3 :00	12,3	88	0	0
	4 :00	12,5	82	0	0
	5 :00	10,4	92	0	0
	6 :00	10,8	90	3	300
	7 :00	12,5	88	2	280
	8 :00	13,0	88	0	0
	9 :00	14,0	91	0	0
	10 :00	14,4	85	0	0
	11 :00	14,5	86	0	0
	12 :00	15,2	82	0	0
	13 :00	15,0	85	10	280
	14 :00	13,4	77	9	280
	15 :00	13,0	77	9	280
	16 :00	13,8	69	8	240
	17 :00	13,0	69	5	220
	18 :00	12,5	71	7	200
	19 :00	10,8	82	8	220
	20 :00	11,9	73	6	220
	21 :00	11,7	72	6	220
	22 :00	11,5	70	9	240
23 :00	9,7	87	11	240	

10 Février 2010	00 :00	11,4	75	7	260
	1 :00	11,7	75	7	240
	2 :00	11,5	80	7	260
	3 :00	10,8	77	6	240
	4 :00	10,2	85	8	280
	5 :00	9,7	86	4	220
	6 :00	9,2	91	8	280
	7 :00	11,2	77	10	280
	8 :00	10,7	79	8	260
	9 :00	11,5	70	10	280
	10 :00	13,0	63	10	300
	11 :00	13,0	52	11	280
	12 :00	13,1	53	11	280
	13 :00	12,5	55	9	260
	14 :00	12,5	57	12	280
	15 :00	13,0	49	11	280
	16 :00	12,5	44	10	28
	17 :00	11,7	49	8	26
	18 :00	11,5	48	9	26
	19 :00	10,3	60	8	26
	20 :00	11,3	53	8	28
	21 :00	11,4	60	4	24
	22 :00	11,0	54	5	24
	23 :00	10,7	55	3	24



# Annexe B

### Analyse bioclimatique de la ville de Jijel

L'analyse bioclimatique repose essentiellement sur l'analyse des données climatiques de la ville de Jijel en exploitant les tableaux de MAHONEY et le diagramme psychrométrique de STEEVE SZOCOLAY pour ressortir enfin avec des recommandations conformes au climat de la région.

#### Les tables de Mahoney:

**Table1:**

#### Température de l'air (°C)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	HIG H	TAM
T. Moy. Max	16, 2	16, 4	18, 9	20, 9	24, 0	28, 2	30, 8	31, 8	28, 8	26, 5	20, 4	17, 4	31.8	19.0
T. Moy. Min	6,2	6,4	8,3	10, 2	13, 6	17, 0	19, 6	20, 6	18, 4	15, 7	10, 8	7,9	6.2	25.6 0
E.D.T .	10, 0	10, 0	10, 6	10, 7	10, 4	11, 2	11, 2	11, 2	10, 4	10, 8	9,6	9,5	LOW	EAT

#### Humidité relative

monthe	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
monthly mean max	92.4	92.7	92.7	93.2	93.3	92.2	90.4	89.1	91.6	92.0	91.6	91.7
monthly mean min	56.8	54.1	54.4	52.8	56.4	51.4	48.8	48.0	51.7	51.8	54.8	55.9
average	74.8	73.4	73.5	73.0	74.8	71.8	69.6	68.5	71.6	71.5	73.2	73.8
humidity groupe	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4

<b>humidity groupe:1</b>	if average below RH below 30
<b>2</b>	30-50
<b>3</b>	50-70
<b>4</b>	above 70

#### Précipitation et vents

monthe	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Precipitation (mm)	154,9	99,5	81,8	63,8	51,6	11,6	3,2	16,1	60,4	56,2	160,0	200,6
Vent (m/s)	2,5	2,9	2,4	2,8	2,4	2,3	2,4	2,4	2	2,1	2,7	2,9

	AMT over 20 °C		AMT 15- 20 °C		AMT below 15 °C	
Limites de confort	day	night	day	night	day	night
humidity groupe: 1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

TABLE 2

Diagnosis: °C

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Moy. Mens. Max.		16,2	16,4	18,9	20,9	24,0	28,2	30,8	31,8	28,8	26,5	20,4	17,4
Confort diurne	Max	25	25	25	25	28	28	30	28	28	28	25	25
	Min	20	20	20	20	21	21	22	21	21	21	20	20
Moy. Mens. Min		6,2	6,4	8,3	10,2	13,6	17,0	19,6	20,6	18,4	15,7	10,8	7,9
night confort	Max	20	20	20	20	21	21	22	21	21	21	20	20
	Min	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Stress thermique	Jour	C	C	C	O	O	H	H	H	H	H	O	C
	Nuit	C	C	C	C	C	O	O	O	O	O	C	C

Indicateurs :

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
humide	H1(ventilation essentielle)						√			√	√			3
	H2 (Ventilation désirable)				√	√						√		3
	H3(Protection pluie)												√	1
Aride	A1(Inertie thermique)							√	√					2
	A2(Dormir dehors)													0
	A3(Prob. Saison froide)	√	√	√	√	√						√	√	7

Définition de l'indicateur	indicateur	Inconfort thermique		Hauteur des précipitations	Groupe d'humidité	Différence mensuelle de température
		jour	nuit			
Mouvement de l'air essentiel	H1	C	-	-	4	-
		C	-	-	2-3	<10°C
Mouvement de l'air désirable	H2	/	-	-	4	-
Protection contre la pluie	H3	-	-	>200 mm	-	-
Capacité thermique	A1	-	-	-	1-2-3	>10°C

nécessaire						
Sommeil extérieur désirable	A2	-	C	-	1-2	-
		C	/	-	1-2	>10°C
Protection contre le froid	A3	F	-	-	-	-

**Définition des indicateurs**

**Table 3 : Recommandations spécifiques**

Totaux indicateurs (d'après la table 5)							
Humide			Aride				
H1	H2	H3	A1	A2	A3		
3	3	1	2	0	7		
<b>Plan de masse</b>							
			0-10			√ Bâtiments orientés suivant un axe longitudinal est-ouest afin de diminuer l'exposition au soleil.	
			11 ou 12		5-12	Plans compacts avec cours intérieures	
					0-4		
<b>Espacement entre bâtiments</b>							
11 - 12						Grands espacements pour favoriser la pénétration du vent	
2-10					√	Comme ci-dessus mais avec protection contre vent chaud/froid	
0- 1						Plans compacts	
<b>Circulation de l'air</b>							
3 -12					√	Bâtiments à simple orientation. Dispositions permettant une circulation d'air permanente.	
1 ou 2			0-5				Bâtiments à double orientation permettant une circulation d'air intermittente.
			6-12				
0	0 - 1					Circulation d'air inutile	

Dimension des ouvertures							
			0 ou 1		0	Grandes, 40 à 80% des façades nord et sud.	
					1-12	Moyennes, 25 à 40 % de la surface des murs	
			2-5			✓	
			6-10			Intermédiaires, 20 à 35 % de la surface des murs.	
			11 ou 12		0-3	Petites, 15 à 25% de la surface des murs.	
					4-12	Moyennes, 25 à 40 % de la surface des murs.	
Position des ouvertures							
3-12						✓	Ouvertures dans les murs nord et sud, à hauteur d'homme du côté exposé au vent.
1 - 2	2-12		0-5				
			6-12				Comme ci-dessus, mais y compris ouvertures pratiquées dans les murs intérieurs.
0	0 -1						
Protection des ouvertures							
					0-2		Se protéger de l'ensoleillement direct
		2-12					Prévoir une protection contre la pluie
Murs et planchers							
			0-2			✓	Constructions légères, faible inertie thermique
			3-12				Construction massive, décalage horaire supérieur à 08 heures
Toiture							
10-12			0-2				Construction légères, couvertures à revêtements réfléchissants et vide d'air.
			3-12			✓	Légère et bien isolée
0-9			0-5				
			6-12				Construction massive, décalage horaire supérieur à 08 heures
Espaces extérieurs							
				1-12			Emplacement pour le sommeil en plein air
		1-12				✓	Drainage approprié des eaux de pluie

D'après cette analyse, nous concluons les orientations de conception suivantes :

- Plan masse : Bâtiments orientés suivant un axe longitudinal est-ouest afin de diminuer l'exposition au soleil.
- Espacements entre bâtiments : Grands espacements pour favoriser la pénétration du vent comme ci-dessus mais avec protection contre vent chaud/froid
- Circulation de l'air : Bâtiments à simple orientation. Dispositions permettant une circulation d'air permanente.
- Dimensions des ouvertures : Moyennes, 25 à 40 % de la surface des murs
- Position des ouvertures : Ouvertures dans les murs nord et sud, à hauteur d'homme du côté exposé au vent.
- Murs et planchers : Constructions légères, faible inertie thermique
- Toiture : Légère et bien isolée
- Espaces extérieurs : Drainage approprié des eaux de pluie

## **2. La méthode de Givoni Baruch :**

Pendant les mois chauds d'Aout, Juin, Juillet et une grande partie du mois de Septembre, une ventilation naturelle et masse thermique moyenne est nécessaire pour réduire l'inconfort dû à la température et l'humidité élevées. Par contre les mois froids de Janvier, Février, Mars, Avril, Novembre, Décembre et une grande partie de Mai et Octobre, le chauffage passif par rayonnement solaire et une masse thermique est obligatoire pour lutter contre une ambiance thermique froide. Mais pour les trois mois d'hiver : Janvier, Février, Décembre le chauffage actif est nécessaire pour arriver au stade de confort ( $T^{\circ}$  min nocturne du mois de Janvier atteint  $6,2^{\circ}\text{C}$ ).

Le confort thermique est marquée pour la période représentée par les mois : une grande partie de mois : Septembre, juin, juillet (période nocturne) et une partie moyenne d'Octobre et Mai (période diurne). L'analyse bioclimatique suivant le diagramme psychométrique de Givoni montre clairement les moyens d'intervention et les dispositifs architecturaux qui peuvent être utilisés pour remédier les sollicitations du climat de Jijel et qui sont :

- La période chaude de : juin, juillet, Aout et Septembre nécessite une ventilation naturelle et même une masse thermique moyenne.
- La période froide : Avril, Mai, Novembre, Octobre : chauffage passif.
- La période très froide de : Janvier, Février, Décembre, une partie de mois de Mars : chauffage passif et actif.

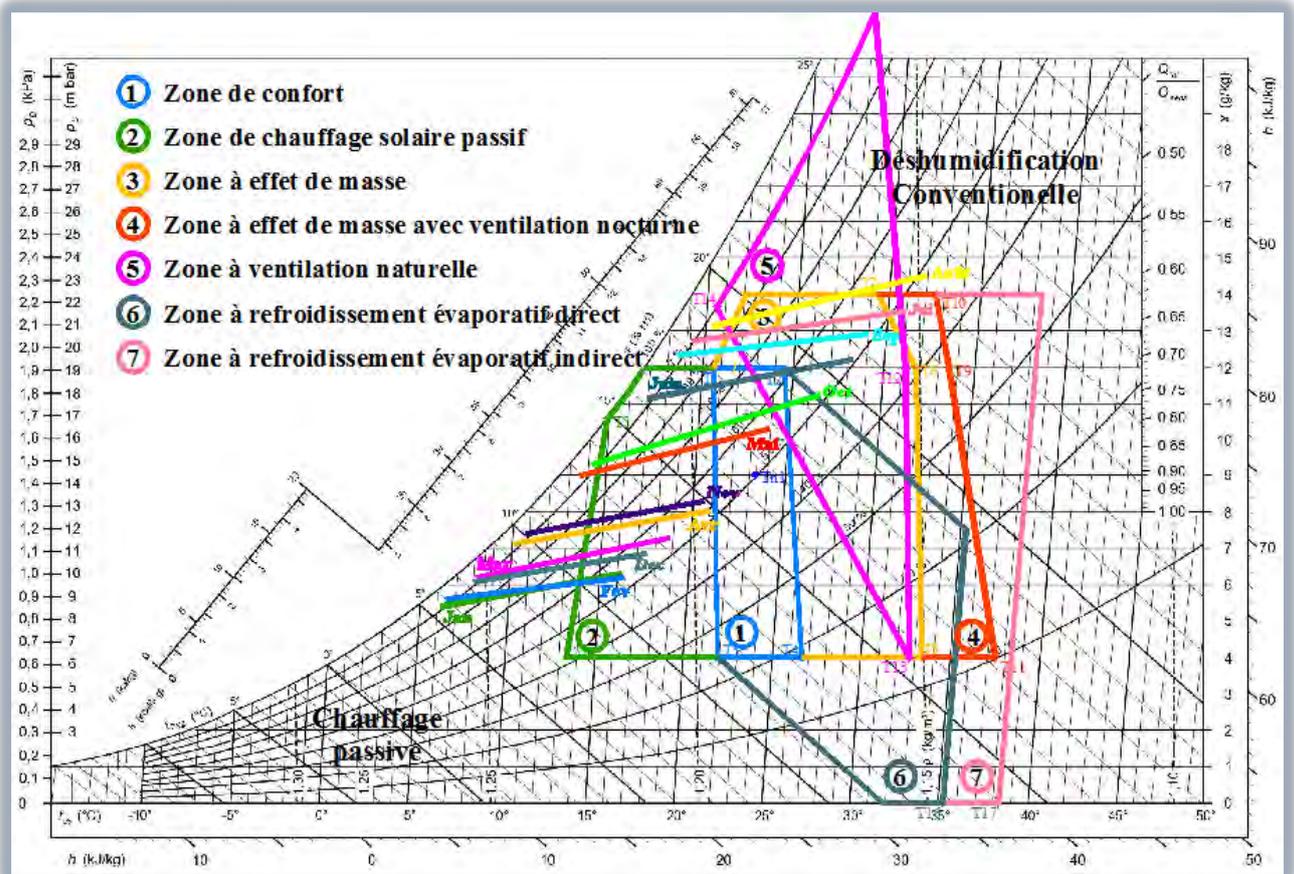


Figure B. 1 : Diagramme psychométrique de GIVONI avec application sur la ville de Jijel.

[Source : Auteur 2009]

**Le diagramme thermo-isoplèthes :**

Ce diagramme met en évidence les variabilités des températures diurne, nocturne et saisonnière, pour obtenir le graphe on projette la température mensuelle maximale (en haut) et minimale (en bas) de chaque mois sur le calculateur des températures horaires et on relié pour chaque mois le max avec la min par un trait. L'intersection des lignes

horizontales avec celles qu'on a tracées donne la température de chaque deux heures (Figure B.3). Cette étape est essentielle pour obtenir le graphe des isothermes (Figure B.2).

### Les isothermes :

Dans la région humide de Jijel, l'isotherme se distingue par quatre grandes zones :

- Une zone de confort : correspond aux mois d'Avril, Mai, Octobre, et la période de 16 :00 h à 10 :00h pour le mois de Septembre, et même la période estivale de 18 :00h jusqu'à 8 :00h du matin où la température est environ est entre 15-28 °C.
- Une zone de chauffe : Comprise autour de la courbe de 30°C, concerne les mois Juin, Juillet, Aout et une période dans le mois de Septembre (de 10 :00-16 :00 h)
- Une zone de sous chauffe très froid : représentée par un cercle fermé de 5 °C concerne les mois de Janvier et Février de 3 à 5 h du matin.
- Une zone de sous chauffe froid : Une aire de froid ou la température est inférieure à 15°C, correspond aux mois de : Janvier, Février, Novembre, Décembre, Mars (de 16 :00-10 :00h)

Calculateur des températures horaires

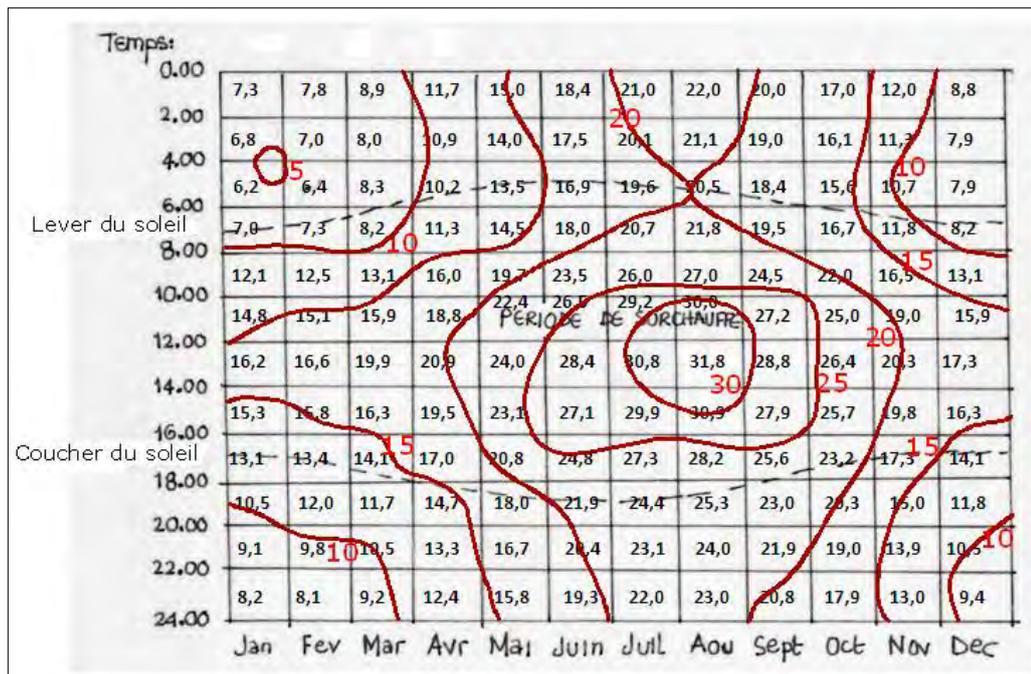


Figure B. 2 : les isothermes

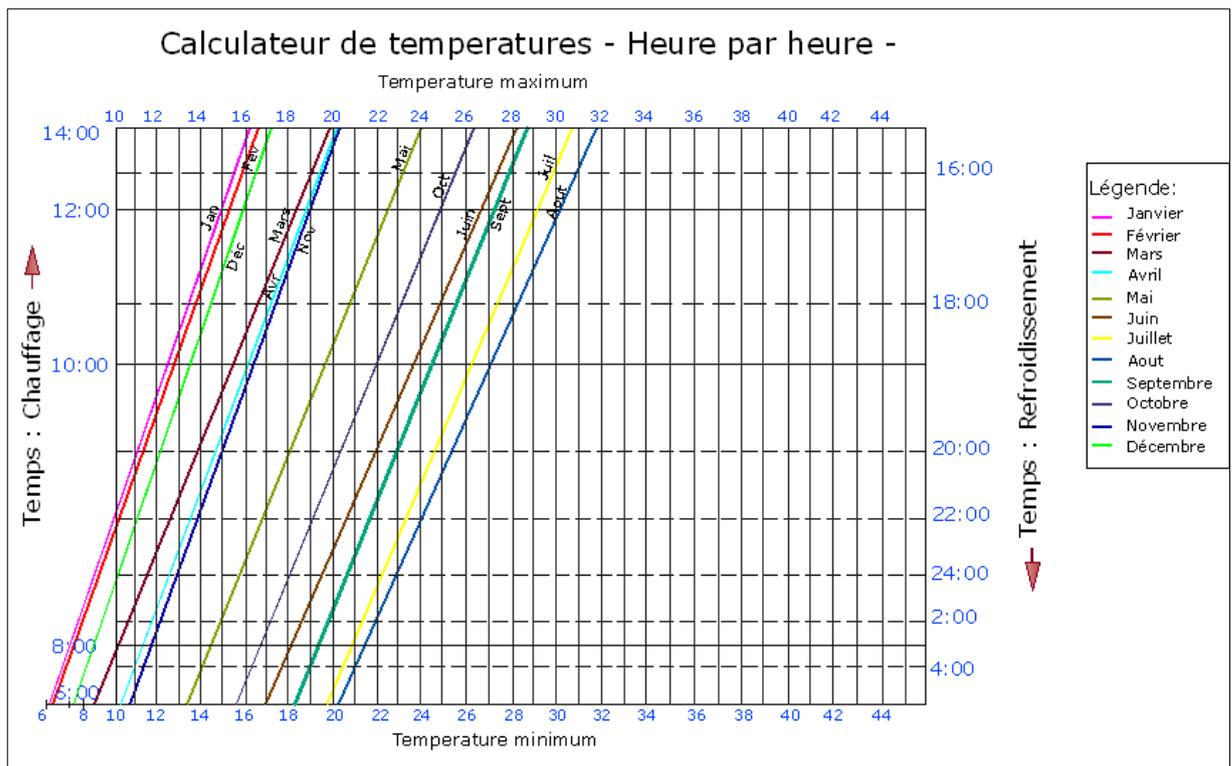


Figure B. 3 : Le diagramme thermo-isoplèthes

**Application de la méthode de STEEV SZOCOLAY sur le climat De La Ville De Jijel :**

**Diagramme psychométrique de la ville de Jijel :**

Détermination des zones de confort pour la ville de Jijel selon la méthode de Steev SZOCOLAY.

**1-Détermination de la température neutre :**

Établir la température moyenne annuelle :

$$T_m = \sum t_m / 12$$

$$T_m = 219,3 / 12 = 18,3 \text{ °C}$$

$$\underline{T_m = 18,3 \text{ °C}} \quad / \quad T_m \text{ Aout : } 26,4$$

La température neutre sera :

$$T_n = 17,6 + (0,31 \times T_m) = 23,27 \text{ °C}$$

$$\underline{T_n = 23,27 \text{ °C}} \quad / \quad T_n = 25,7$$

Porter sur le graphe le point neutre à l'intersection de  $T_n$  et la ligne représentant 50 % d'humidité relative.

**2-Détermination de la zone de confort :**

Cette zone est délimitée par les points 1, 2, 3, 4

La température de point 1 sera :

$$T_1 = T_n + [(A_{hn} - 12) \times 0,025 \times (T_n - 14)] - 2$$

Où  $A_{hn}$  représente l'humidité absolue du point de neutralité.

$$A_{hn} = 9 \text{ g/kg}$$

$$T_1 = 23,27 + [(9 - 12) \times 0,025 \times (23,27 - 14)] - 2$$

$$T_1 = 23,27 + [(-3) \times 0,025 \times (-9,27)] - 2$$

$$\underline{T_1 = 20,57 \text{ °C}} \quad / \quad 22,8$$

$$T_2 = T_1 + 4$$

$$\underline{T_2 = 24,57 \text{ °C}} \quad / \quad 26,8$$

$$T_3 = T_1 + 0,2 \times (T_1 - 14)$$

$$\underline{T_3 = 21,88 \text{ °C}} \quad / \quad 25,36$$

$$T_4 = T_2 + 0,2 \times (T_2 - 14)$$

$$\underline{T_4 = 26,68 \text{ °C}} \quad / \quad 29,3$$

Les points 1 et 2 correspondront à celle de 12 g/kg

Les points 3 et 4 correspondront à celle de 04 g/kg

### 3-Détermination de la zone de contrôle pénitentiel pour les périodes froides:

#### Zone de chauffage solaire passif :

$$T5 = T_n + 0,36 - 0,0025 \times H_v$$

Ou  $H_v$  moyenne journalière totale d'radiation solaire en  $Wh/m^2$  d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid donc :

$$H_v \text{ Jijel} = 3542 \text{ Wh/m}^2$$

$$T5 = 23,27 + 0,36 - [0,0025 \times 3542]$$

$$T5 = 14,77^\circ\text{C}$$

Le point T5 correspond à la ligne de saturation HB =100%

### 4-Détermination de la zone de contrôle pénitentiel pour les périodes chaudes:

#### Zone d'effet de masse :

Détermination de la variation moyenne de température pour le mois le plus chaud :

$$dT_m = T_{\text{moy.max}} - T_{\text{moy.min}}$$

$$dT_m = 31,8 - 20,6$$

$$dT_m = 11,2^\circ\text{C}$$

Cette zone est délimitée par les points 6, 7 et 8

$$T6 = T2 + [0,5 \times dT_m]$$

$$T6 = 24,57 + [0,5 \times 11,2]$$

$$T6 = 30,17^\circ\text{C}$$

Le point 6 correspond à la ligne de l'humidité absolue 12 g/kg

$$T7 = T6 - 0,05 (T6 - 14)$$

$$T7 = 30,17 - 0,05 (30,17 - 14)$$

$$T7 = 29,36^\circ\text{C}$$

Le point 7 correspond à la ligne de l'humidité absolue 14 g/kg

$$T8 = T6 + 0,2 (T6 - 14)$$

$$T8 = 30,17 + 0,2 (30,17 - 14)$$

$$T8 = 33,40^\circ\text{C}$$

Le point 8 correspond à la ligne de l'humidité absolue 4 g/kg

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'HR du point 1

#### Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne :

Cette zone est délimitée par les points 9, 10 et 11

$$T9 = T2 + 0,8 (dTm)$$

$$T9 = 24,57 + 0,8 (11,2) = 35 \text{ °C}$$

$$\underline{T9 = 33,53 \text{ °C}}$$

Le point 9 correspondent à la ligne de l'humidité absolue 12 g/kg

$$T10 = T9 - 0,05 (T9 - 14)$$

$$T10 = 33,53 - 0,05 (33,53 - 14)$$

$$\underline{T10 = 32,55 \text{ °C}}$$

Le point 10 correspondent à la ligne de l'humidité absolue 14 g/kg

$$T11 = T9 + 0,2 (T9 - 14)$$

$$T11 = 33,53 + 0,2 (33,53 - 14)$$

$$\underline{T11 = 37,43 \text{ °C}}$$

Le point 11 correspondent à la ligne de l'humidité absolue 4 g/kg

### Zone de ventilation naturelle :

Cette zone dépend de la vitesse de l'air.

$$\text{Pour } 1\text{m/s} : T12 = T2 + 5$$

$$\text{Pour } 1,5\text{m/s} : T12 = 24,57 + 6,5$$

$$\underline{T12 = 31,07 \text{ °C}}$$

Le point 12 correspondent à la ligne de l'humidité absolue 12 g/kg

$$\text{Pour } 1\text{m/s} : T13 = T12 + 0,1 (T12-14)$$

$$\text{Pour } 1,5\text{m/s} : T13 = 31,07 + 0,1 (31,07-14)$$

$$\underline{T13 = 32,77 \text{ °C}}$$

Le point 13 correspondent à la ligne de l'humidité absolue 4 g/kg

$$T14 = T1 = 19,58 \text{ °C}$$

$$\underline{T14 = 20,57 \text{ °C}}$$

Le point 14 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative

$$T15 = T12 - 0,18 (T12-14)$$

$$T15 = 31,07 - 0,18 (31,07-14)$$

$$\underline{T15 = 28,00 \text{ °C}}$$

Le point 15 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative

### Zone de refroidissement évaporatif direct :

La température limite le plus élevé est :

$$T16 = Tn + 12$$

$$T16 = 23,27 + 12 =$$

$$T_{16} = 35,27^{\circ}\text{C}$$

Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de température humides des points 2 et 3.

#### e- Zone de refroidissement évaporatif indirect :

La température limite la plus haute est :

$$T_{17} = T_n + 15$$

$$T_{17} = 23,27 + 15 =$$

$$T_{17} = 38,27^{\circ}\text{C}$$

La limite supérieure de cette zone correspond à la ligne de l'humidité absolue 14 g/kg

#### 4-représentation des conditions climatiques qui prévalent :

Chaque mois est représenté par une ligne dessinée entre deux points :

- La température moyenne maximale mensuelle avec l'humidité relative minimale
- La température moyenne minimale mensuelle avec l'humidité relative minimale

La méthode de SZOCOLAY consiste à établir la zone neutre en plus des différentes zones selon les données climatiques propres à chaque région. Tout en s'inspirant des travaux de ses prédécesseurs, OLGAY et GIVONI.

SZOCOLAY a voulu intégrer la donnée climatique comme faisant partie intégrante de la conception architecturale.

Plus spécifique que le diagramme de GIVONI, la méthode de SZOCOLAY permet de déterminer les différentes zones qui composent le diagramme avec les données climatiques spécifiques aux régions concernées.

En localisant une zone de confort on détermine les limites au-delà desquelles des moyens passifs ou actifs doivent être mis en œuvre pour arriver au confort nécessaire de l'utilisateur.

Après avoir reportés les différents mois sur le diagramme, chaque mois étant représenté par une ligne dessinée entre deux points ; nous observons que :

La moitié de l'année se situe en dehors de la zone de confort à partir du mois de novembre jusqu'au mois de Avril.

La partie de saison d'hiver se situe dans la zone de chauffage actif (mécanique) ; il s'agit des mois d'octobre jusqu'au mois de Mai. Une grande partie des mois d'octobre et Mai, et une petite partie des mois de novembre, avril, mars, juin, juillet, et septembre, se situe dans la zone de chauffage solaire passif (Favoriser le chauffage par l'ensoleillement, une bonne pénétration du soleil en hiver, utiliser les matériaux appropriés, agir sur les parois).

La chaleur captée le jour peut être ainsi restituée la nuit grâce à la masse thermique, car durant cette saison les températures nocturnes sont très froides.

Une partie de la saison d'été (mois de Mai jusqu'au mois d'octobre) se situe dans la zone de confort.

Les mois d'octobre et Mai traversent 3 zones : celle de chauffage actif, de chauffage passif, et de confort.

Une partie de la saison d'été (mois de juin, juillet, août, et septembre) ont une partie dans la zone de refroidissement passif : ventilation naturelle, effet de masse, refroidissement évaporatif direct.

Une petite partie des mois de juillet, et Août se trouve dans la zone d'effet de masse avec ventilation nocturne.

On peut répartir le diagramme en 4 parties, une partie des mois se trouve dans la zone de confort, une autre partie avec un chauffage passif suffit pour obtenir le confort, alors dans l'autre partie de saison d'hiver il faut un chauffage actif pour atteindre le confort, et la partie de saison d'été qui connaît un surchauffage passif et qui nécessite un rafraîchissement passif avec une ventilation nocturne associée à une forte inertie par absorption, sauf pour une partie des mois les plus chauds (juillet et août), il faut en plus un refroidissement actif (climatisation).



# Annexe C

## Les indices de confort

Le contrôle des ambiances intérieures nécessite, comme dans le cas particulier de contrôle de la qualité de l'air, la définition d'un paramètre contrôle. Dans le cas du contrôle du confort thermique des occupants, ce paramètre, également appelé indice de confort, peut s'exprimer de multiples manières. [CODIER. 2007]

### ❖ La température de l'air ambiant

La température de l'air ambiant, est le paramètre le plus couramment employé, et le plus immédiat à évaluer. Purement physique, ce paramètre ne présente pas de grosses difficultés de mesure et d'évaluation, mais revêt un caractère toutefois limité pour la caractérisation complète du confort.

### ❖ La température opérative

La température opérative,  $T_{op}$  est un indice de confort thermique intégrant deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Elle définit la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et par convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve (Equation 1)

$$T_{op} = \alpha T_a + (1 - \alpha) T_{mrt} \dots\dots\dots \text{(Equation 1)}$$

$T_{op}$  : la température opérative [°C]

$T_a$  : la température d'air [°C]

$T_{mrt}$  : la température moyenne radiante [°C]

$\alpha$  : coefficient fonction de la vitesse d'air

### ❖ Le PMV :

Le PMV, Predicted Mean Vote (Vote moyen Prévisible), est un indice établi à partir du modèle de FANGER pour caractériser le confort thermique.

Le PMV permet de lier, pour un groupe d'individus, le résidu L de l'équation du bilan thermique et le métabolisme M de l'individu à une sensation de confort thermique établie sur une échelle de valeurs selon les normes ASHARE et ISO 7730 (tableau C.1). FANGER

a ainsi pu établir une formule empirique de l'indice PMV, sur la base d'expérimentation menées auprès d'un panel de près de 1400 individus (Equation 2).

$$PMV = L (0,303 e^{-0,0036M} + 0,028) \dots \dots \dots \text{(Equation 2)}$$

Avec: *M* le métabolisme [met]

**Tableau C. 1 : Correspondances entre les valeurs du PMV et l'échelle de sensation thermique (ASHARE)**

[Source :CODIER. 2007]

Valeurs de l'indice PMV	-3	-2	-1	0	1	2	3
Sensation thermique	Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Caud

❖ **Le PPD :**

Parallèlement au PMV, FANGER a développé un autre indice, le PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied (Pourcentage Prévisible de personnes Insatisfaites), sur la base d'analyses statistique. Le PPD permet d'évaluer le rapport d'occupants insatisfaits des conditions de confort thermique constatées.

$$PPD = 100 - 9 e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179 PMV^2)} \dots \dots \dots \text{(Equation 3)}$$

Il est à noter que le PPD, tel que défini à l'équation 3, ne permet pas d'obtenir une entière satisfaction de part des occupants. Même en l'absence de toute sensation d'inconfort thermique, au sens défini par l'indice PMV (PMV =0), le minimum d'insatisfaction est de 5% traduisant le caractère subjectif de l'évaluation du confort thermique, et difficulté d'obtenir, dans ce domaine, une unanimité sur le jugement. [CODIER. 2007]

➤ **Les plages de confort définissent par la formule de Humphrey :**

En analysant les résultats d'un grand nombre d'étude in situ réalisées à travers le monde (pour différents climats, saisons et cultures), Humphrey a trouvé que la température de confort et fortement corrélée à la moyenne de la température intérieure mesurée. Puisque cette dernière dépend de la température extérieure, Humphrey a essayé d'exprimer la température de confort en fonction du climat extérieure. Il a utilisé la moyenne mensuelle

de la température extérieure comme variable indépendante pour tracer les variations de la température de confort considérée comme variable dépendante. [Nicol. 2002]

Les formules développées permettent ainsi de calculer la température de confort en fonction du climat extérieure selon le type du traitement thermique des bâtiments. Humphrey a proposé une régression linéaire pour calculer la température de confort  $T_c$  en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure  $T_o$ .

$$T_c = 11,9 + 0,534T_o$$

Limite supérieure de confort :  $T_{sup} = T_c + 2$

Limite Inferieure de confort:  $T_{inf} = T_c - 2$

Avec :  $T_c$  : la température du confort

$T_o$  : la température moyenne du mois

**Tableau C. 2 : Les plages de confort définissent par la formule de Humphrey pour la ville de Jijel**

[Source :auteur 2010]

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
$T_o$	11,2	11,6	13,5	16	19,1	23	25,6	26,4	23,7	21,1	15,6	12,5
$T_c$	17,9	18,1	19,1	20,4	22,1	24,2	25,6	26,0	24,6	23,2	20,2	18,6
$T_{sup}$	19,9	20,1	21,1	22,4	24,1	26,2	27,6	28,0	26,6	25,2	22,2	20,6
$T_{inf}$	15,9	16,1	17,1	18,4	20,1	22,2	23,6	24,0	22,6	21,2	18,2	16,6



# Annexe D

## Les conditions internes appliquées aux différentes zones

Name:

Description:

Include Solar in MRT

été 2009  
 hiver 2010  
 été2010  
 jours de l'année

**Internal Gain** | Heating Emitter | Cooling Emitter | Thermostat

Name:

Description:

Radiant Proportion

Lighting:

Occupant:

Equipment:

View Coefficient

Lighting:

Occupant:

Equipment:

Gain	Value	Factor	Setback Value	Schedule
Infiltration	0,5 ach	1,0	0,0 ach	
Ventilation	0,0 ach	1,0	0,0 ach	
Lighting Gain	5,0 W/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	Office 8am to 6pm ...
Occupancy Sensib...	4,0 W/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	Office 8am to 6pm ...
Occupancy Latent...	2,0 W/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	Office 8am to 6pm ...
Equipment Sensibl...	0,0 W/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Equipment Latent ...	0,0 W/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Pollutant Generati...	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	

System Parameters

Metabolic Rate:     DHW:     Outside Air:     Target Room Illuminance:

**Figure D. 1 conditions internes appliquées aux zones de l'atrium**

[Source : EDSL Tas version 9.1.4.2. 2010]

Name:   Include Solar in MRT

Description:

**Internal Gain** | Heating Emitter | Cooling Emitter | Thermostat

Name:  Radiant Proportion: Lighting  Occupant  Equipment  View Coefficient: Lighting  Occupant  Equipment

Gain	Value	Factor	Setback Value	Schedule
Infiltration	0,35 ach	1,0	0,0 ach	
Ventilation	0,0 ach	1,0	0,0 ach	
Lighting Gain	Yearly	5,2	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Occupancy Sensib...	Yearly	7,7	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Occupancy Latent...	Yearly	7,7	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Equipment Sensibl...	Yearly	2,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Equipment Latent ...	Yearly	0,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Pollutant Generati...	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	

System Parameters: Metabolic Rate  DHW  Outside Air  Target Room Illuminance

**Figure D. 2 : conditions internes appliquées aux zones des coursives**

[Source : EDSL Tas version 9.1.4.2. 2010]

Name:   Include Solar in MRT

Description:

été 2009  
hiver 2010  
été2010  
jours de l'année

**Internal Gain** Heating Emitter Cooling Emitter Thermostat

Name:

Description:

Radiant Proportion

Lighting:

Occupant:

Equipment:

View Coefficient

Lighting:

Occupant:

Equipment:

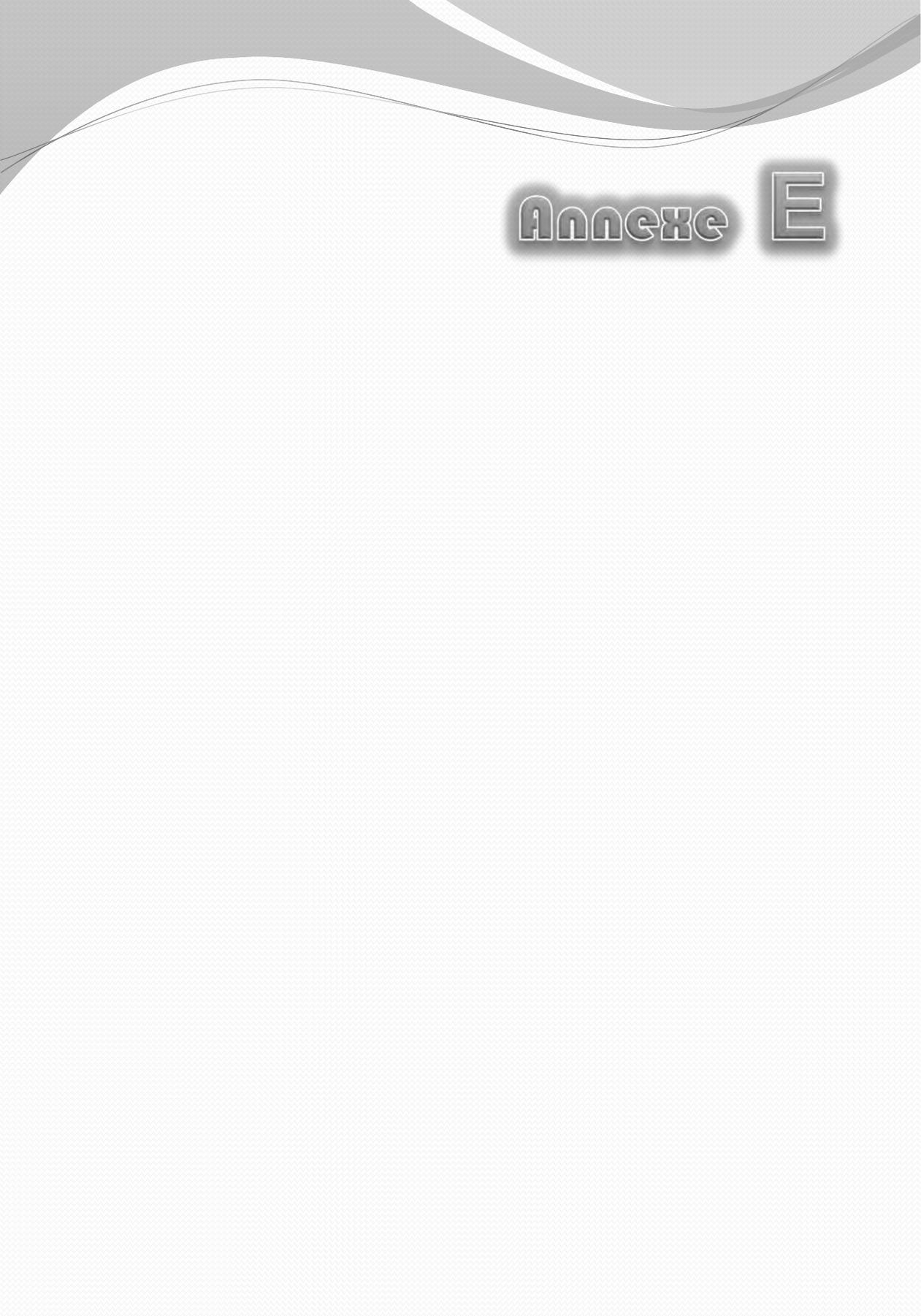
Gain	Value	Factor	Setback Value	Schedule
Infiltration	0,35 ach	1,0	0,0 ach	
Ventilation	0,0 ach	1,0	0,0 ach	
Lighting Gain	Yearly	3,75	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Occupancy Sensib...	Yearly	9,394	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Occupancy Latent...	Yearly	6,006	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Equipment Sensibl...	Yearly	50,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Equipment Latent ...	Yearly	0,0	0,0 W/m <sup>2</sup>	
Pollutant Generati...	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	1,0	0,0 g/hr/m <sup>2</sup>	

System Parameters

Metabolic Rate:  DHW:  Outside Air:  Target Room Illuminance:

**Figure D. 3 : conditions internes appliquées aux zones des espaces adjacents**

[Source : EDSL Tas version 9.1.4.2. 2010]



# Annexe E

**Considérations théoriques : cas de la ventilation naturelle par tirage thermique**

(Méthode proposée par K.T. ANDERSEN)

Ventilation à travers deux ouvertures séparées

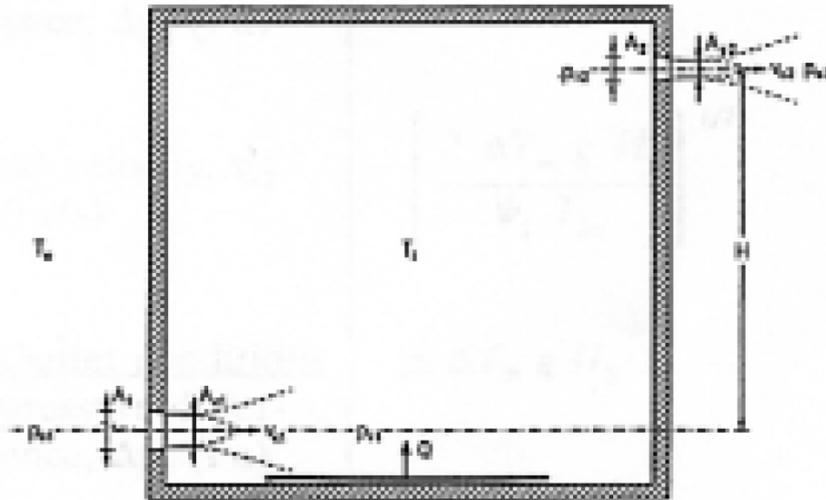


Figure E. 1: ventilation naturelle à travers deux ouvertures par tirage thermique

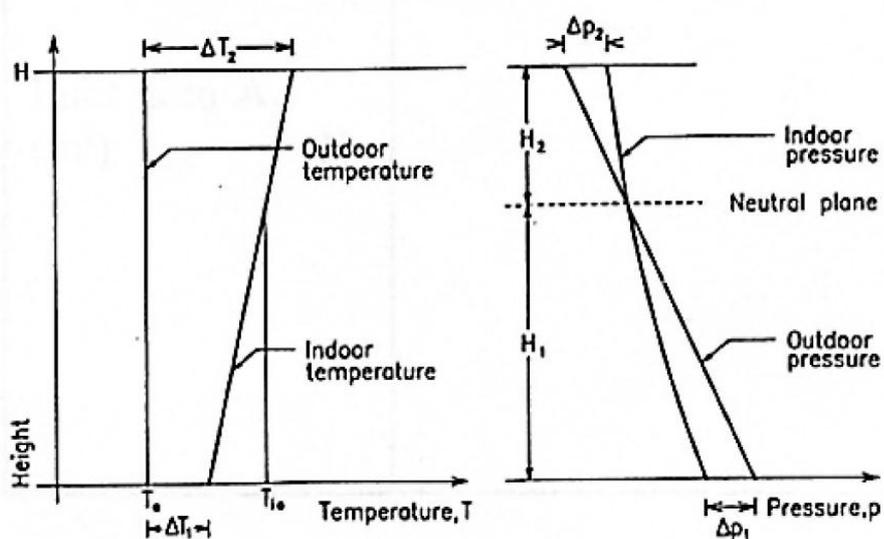


Figure E. 2: différences de pression

**1. Cas de la température uniforme :**

Dans ce cas, on considère qu'un local est muni de seulement deux ouvertures placées à des hauteurs différentes comme le montre la figure 1. Ce local est chauffé (apport de

chaleur  $Q_s$ ) et est supposé à température constante. On obtient alors (par différence de pression) à l'ouverture basse (qui constitue l'entrée d'air) une pression intérieure négative, tandis qu'à l'ouverture haute la pression est positive. Entre les deux ouvertures les pressions intérieure et extérieure s'égalisent au plan neutre. Les équations suivantes, concernant la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement peuvent être établies pour déterminer le flux d'air passant à travers les ouvertures :

$$\rho_0 A_{c1} v_{c1} = \rho_{i2} A_{c2} v_{c2} \text{ (Conservation de la masse)} \quad (1)$$

$$\text{Et : } Q_s = c_p \rho_{i2} A_{c2} v_{c2} \Delta T_2 = c_p \rho_0 A_{c1} v_{c1} \Delta T_2 = c_p \rho_0 V \Delta T_2 \text{ (Conservation de l'énergie)} \quad (2)$$

$\rho_0, \rho_{i2}$  : densités de l'air passant à travers les ouvertures

$A_{c1}, A_{c2}$  : surfaces des ouvertures contractées

$v_{c1}, v_{c2}$  : vitesse d'air dans les ouvertures

$Q_s$  : surplus de chaleur

$\Delta T_2$  : différence

$V$  : taux de ventilation

Pour la distribution verticale des pressions on a :

$$p_{i1} - p_{i2} = \rho_i gH \text{ (différence de pression à l'intérieur)} \quad (3a)$$

$$p_{o1} - p_{o2} = \rho_o gH \text{ (différence de pression à l'extérieur)} \quad (3b)$$

$$\Delta p_1 - \Delta p_2 = \Delta \rho gH \quad (4)$$

Les trois équations (1,2 et 3) contiennent cinq inconnues ( $\Delta T, v_{c1}, v_{c2}, \Delta p_1$  et  $\Delta p_2$ ). Deux autres équations sont alors nécessaires pour la résolution du système d'équation. Elles peuvent être dérivées à partir de la relation qui existe entre les vitesses d'air dans les entrées et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur des ouvertures.

$$\Delta p_1 / \rho_0 = v_{c1}^2 / 2 + \zeta_1 v_{c1}^2 / 2 = \psi_1 v_{c1}^2 / 2 \quad (5)$$

(Equation de Bernoulli modifiée à travers l'entrée d'air)

$$\Delta p_2 / \rho_i = v_{c2}^2 / 2 + \zeta_2 v_{c2}^2 / 2 = \psi_2 v_{c2}^2 / 2 \quad (6)$$

(Equation de Bernoulli modifiée à travers la sortie d'air)

Avec :  $\psi_1 = 1 + \zeta_1$  et  $\psi_2 = 1 + \zeta_2$  (coefficient d'écoulement à l'entrée et à la sortie)

- **Solution basée sur la différence de densité**

La résolution des équations 1, 4,5 et 6 nous donne la solution suivante :

$$v_{c1} = \left( \frac{2\Delta\rho g H_1}{\psi_1 \rho_0} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$v_{c2} = \left( \frac{2\Delta\rho g H_2}{\psi_2 \rho_i} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Avec :

$$\Delta p_1 = \Delta\rho g H_1 \quad (9)$$

$$\Delta p_2 = \Delta\rho g H_2 \quad (10)$$

Et  $H_1 + H_2 = H$

Les hauteurs qui permettent de déterminer la position du plan neutre est définie par :

$$H = \frac{H}{1 = (T_i/T_0)(\psi_2/\psi_1)^2 (A_{c1}/A_{c2})^2} \quad (11)$$

$$H = \frac{H}{1 = (T_0/T_i)(\psi_1/\psi_2)^2 (A_{c2}/A_{c1})^2} \quad (12)$$

partir des vitesses d'air  $v_{c1}$  et  $v_{c2}$ , on peut déterminer le volume d'air qui traverse les deux ouvertures. Nous obtenons alors pour l'ouverture basse :

$$V_1 = v_{c1} A_{c1} = C_{c1} A_1 \left( \frac{2\Delta\rho g H_1}{\rho_0 \psi_1} \right)^{1/2} = C_{d1} A_1 \left( \frac{2\Delta\rho g H_1}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Pour l'ouverture haute, on obtient :

$$V_2 = v_{c2} A_{c2} = C_{c2} A_2 \left( \frac{2\Delta\rho g H_2}{\rho_0 \psi_2} \right)^{1/2} = C_{d2} A_2 \left( \frac{2\Delta\rho g H_2}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (13)$$

avec le coefficient de décharge  $C_d$  qui est égal à :

$$C_{d1} = C_{v1}C_{c1} = C_{c1}/(1 + \zeta_1)^{1/2} \text{ et } C_{d2} = C_{v2}C_{c2} = C_{c2}/(1 + \zeta_2)^{1/2}$$

**Equations supplémentaires**

Les équations précédentes nécessitent la connaissance de la différence de densité. Habituellement, les quantités connues sont les températures ou les apports de chaleur. Pour exprimer ces équations en fonction de T et, il est nécessaire d'établir la relation entre, d'une part la densité et différence de température, et d'autre part entre la différence de température et les apports de chaleur.

**Relation entre la température et la densité :**

L'air peut être considéré comme un gaz parfait suivant l'équation :  $p = \rho RT$  (15)

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho_i = \frac{1}{R} \left( \frac{p_0 T_i - p_i T_0}{T_0 T_i} \right)$$

Cette équation peut être réduite :

$$\Delta\rho = \frac{\rho_0 \Delta T}{T_i} \left( 1 - \frac{T_0 \Delta p}{\Delta T p_0} \right) = \frac{\rho_0 \Delta T}{T_i} (1 - K) \quad (16a)$$

Dans les conditions normales, la valeur de la constante K (valeur de correction) est inférieure à 0.01. L'expression suivante peut être utilisée pour l'air sec avec une erreur inférieure à 1% :

$$\Delta\rho = \rho_0 \Delta T / T_i = \rho_i \Delta T / T_0 \quad (16b)$$

Cependant, l'humidité influence la densité de l'air. En prenant en compte l'humidité, on peut dériver de l'équation (16a) une expression similaire mais avec un facteur de correction positif. Le facteur de correction pour des conditions d'été sera égal à 0.08 et en hiver 0.02. Ce qui veut dire qu'en conditions normales, on peut utiliser l'équation (16b) pour exprimer la relation entre la densité et la différence de température.

**Relation entre la température et les apports de chaleur :**

La quantité  $Q_s$  dans l'équation (1) représente le surplus de chaleur nécessaire pour chauffer l'air entrant. C'est aussi la chaleur qui est évacuée par l'air sortant (par la ventilation) quand un état stable est maintenu. A partir de l'équation (2) on obtient :

$$\Delta T = \frac{Q_s}{\rho_0 c_p A_{c1} v_{c1}} = \frac{Q_s}{\rho_0 c_p V_1} = \frac{Q_s}{\rho_i c_p V_2} \quad (17)$$

Le surplus de chaleur représente le gain de chaleur (provenant des usagers, des équipements électriques, des gains solaires, des systèmes de chauffage, etc.) moins les pertes de chaleur dues à la transmission à travers les surfaces ainsi que les infiltrations. Ces pertes de chaleur sont à leurs tours dépendantes de la température de l'air intérieur, des calculs itératifs sont alors nécessaires pour déterminer le surplus de chaleur.

- **Solution basée sur la différence de température**

En remplaçant la différence de densité par la différence de température on obtient la solution suivante :

$$v_{c1} = \left( \frac{2\Delta T g H_1}{T_i \psi_1} \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$v_{c2} = \left( \frac{2\Delta T g H_1}{T_0 \psi_1} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$\Delta p_1 = \rho_0 g H_1 \Delta T / T_i \quad (20a)$$

$$\Delta p_2 = \rho_i g H_2 \Delta T / T_0 \quad (20b)$$

Avec:

$$H = \frac{H}{1 = (T_i/T_0)(C_{d1}/C_{d2})^2 (A_1/A_2)^2} \quad (21a)$$

$$H = \frac{H}{1 = (T_0/T_i)(C_{d2}/C_{d1})^2 (A_1/A_2)^2} \quad (21b)$$

La capacité de ventilation (le volume d'air entrant) est déterminée par :

$$V_1 = C_{d1} A_1 \left( \frac{2g H_1 \Delta T}{T_i} \right)^{1/2} \quad (22)$$

Et 
$$V_2 = C_{d2} A_{21} \left( \frac{2g H_2 \Delta T}{T_0} \right)^{1/2} \quad (23)$$

• Solution basée sur le surplus de chaleur

$$\Delta T = \frac{Q_s T_i^{1/2}}{\rho_0 c_p C_{d1} A_1 (2gH_1 \Delta T)^{1/2}}$$

On obtient alors :

$$\Delta T = \left( \frac{Q_s}{\rho_0 c_p C_{d1} A_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{T_i}{2gH_1} \right)^{1/3} = \left( \frac{Q_s}{\rho_0 T_i c_p C_{d1} A_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{T_i}{2gH_1} \right)^{1/3} T_i$$

La densité de l' air peut être remplacée par la relation suivante :

$$\rho_0 T_i = \rho_0 T_0 (T_i/T_0) = (\rho_0/R)(T_i/T_0)$$

$$\Delta T = \left( \frac{R}{\rho_0 c_p} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{2g} \right)^{1/3} \left( \frac{T_0}{T_i} \right)^{2/3} \left( \frac{Q_s}{C_{d1} A_1} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{H_1} \right)^{1/3} T_i \quad (24)$$

En remplaçant les constantes suivantes par leurs valeurs :

$$R = 287 \text{ J/(kg.K)}$$

$$\rho_0 = 101300 \text{ Pa}$$

$$c_p = 1010 \text{ J/(kg.K)}$$

$$g = 9.82 \text{ m/s}$$

Et en estimant, avec une erreur de moins de 3% que dans les conditions réelles :

$$T_0/T_i = 1 - \Delta T/T_i \approx 0.95$$

On obtient avec moins de 2% d'erreur :

$$\Delta T = 7.1 \times 10^{-5} T_i \left( \frac{Q_s}{C_{d1} A_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{H_1} \right)^{1/3} \quad (25)$$

Et 
$$\Delta T = 7.1 \times 10^{-5} T_0 \left( \frac{Q_s}{C_{d2} A_2} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{H_2} \right)^{1/3} \quad (26)$$

On obtient alors une solution basée sur  $Q_s$ :

$$v_{c1} = 0.037 \left( \frac{Q_s H_1}{C_{d1} A_1} \right)^{1/3} \left( \frac{1}{\psi_1} \right)^{1/2} \quad (27)$$

$$v_{c2} = 0.037 \left( \frac{Q_s H_2}{C_{d2} A_2} \right)^{1/3} \left( \frac{1}{\psi_1} \right)^{1/2} \quad (28)$$

$$V_1 = 0.037 (Q_s H_1)^{1/3} (C_{d1} A_1)^{1/2} \quad (29)$$

$$V_1 = 0.038 (Q_s H_2)^{1/3} (C_{d2} A_2)^{1/2} \quad (29)$$

## 2. Cas de la stratification des températures

Le cas d'une stratification linéaire est le plus simple à traiter. La température intérieure peut être exprimée par :

$$T_i = T_{in} + ay \quad (31)$$

Le facteur  $a$  représente le gradient de la température verticale. Il est égal à  $\Delta T_{12}$  étant la différence de température entre les deux ouvertures. La variation de la densité de l'air peut être exprimée par :

$$\rho_i = p_{in} T_{in} / T_i = \rho_{in} T_{in} / (T_{in} + ay) \quad (32)$$

On peut obtenir alors la distribution de la pression à l'intérieur :

$$\rho_i = p_{in} - \int_0^y g \rho_i dy = \rho_{in} - g \rho_{in} T_{in} \int_0^y \frac{dy}{T_{in} + ay} = p_{in} - g \rho_{in} T_{in} (1/a) [1n(T_{in} + ay)]_0^y = p_{in} - g \rho_{in} T_{in} (1/a) 1n(1 + ay/T_{in}) \quad (33)$$

Le gradient de température  $a$  sera de 1 K/m et le terme  $ay / T_{in}$  devient si petit que l'équation précédente peut être exprimée :

$$\begin{aligned} p_i &\approx p_{in} - g \rho_{in} T_{in} (1/a) (ay/T_{in} - 0.5(ay/T_{in})^2) \\ &= p_{in} - g \rho_{in} y + 0.5 g \rho_{in} (a/T_{in}) y^2 \\ &= p_{in} - g \rho_{in} y + 0.5 g b y^2 \end{aligned} \quad (34)$$

Avec :

$$b = \rho_{in} a / T_{in} = \rho_{in} (\Delta T_{12} / H) T_{in}$$

$p_{in}$  : pression intérieure au plan neutre

$g$  : accélération

$\rho_{in}$  : densité de l'air au plan neutre et le centre de l'ouverture haute

$y$  : distance verticale entre le plan neutre et

$a$  : gradient vertical des températures intérieures

La position du plan neutre peut être déterminée par l'équation précédente :

$$\Delta p_1 = \Delta \rho_n g H_1 - b g H_1^2 / 2 \quad (35)$$

$$\Delta p_2 = \Delta \rho_n g H_2 - b g H_2^2 / 2 \quad (36)$$

• Solutions :

A partir des équations précédentes, on peut déterminer le plan neutre. Des solutions dérivées peuvent être obtenues sur la base de la différence de température (intérieur/extérieur) et du surplus de chaleur.

• Détermination du plan neutre :

Les vitesses d'air à travers les ouvertures contractées peuvent être calculées à partir des équations 5, 6, 35 et 38. En remplaçant ces vitesses dans l'équation (1) et après avoir simplifié et admis que :  $\rho_{in} / \rho_o \approx 1$  et  $\psi_1 / \psi_2 \approx 1$ , on obtient :

$$A_{c1}^2 (\Delta \rho_n g H_1 - b g H_1^2 / 2) = A_{c2}^2 (\Delta \rho_n g H_2 + b g H_2^2 / 2) \quad (37)$$

Avec :  $H_2 = H - H_1$  et  $\Delta \rho_n$  dépendant de  $H_1$ .

Solution basée sur la différence de température

En introduisant la relation qui existe entre la densité de l'air et sa température, on obtient :

$$\Delta \rho = \rho_0 \Delta T / T_i = \rho_i \Delta T / T_0 \quad (38)$$

On obtient alors une solution basée sur les différences de température. Les vitesses d'air peuvent être déterminées (avec une bonne approximation) :

$$v_{c1} = (2 \Delta T_m g H_{1u} / (\psi_1 T_{im}))^{1/2} \quad (39a)$$

$$v_{c2} = (2 \Delta T_m g H_{2u} / (\psi_2 T_o))^{1/2} \quad (39b)$$

Avec:

$$C_{d1} = (A_{c1}/A_2)/\psi_1^{1/2}$$

$C_{d1}$  : coefficient de décharge de l'entrée

$A_1$  : surface de l'entrée

• **Solution basée sur le surplus de chaleur**

Dans l'équation (2), le taux de ventilation peut être éliminé en utilisant l'équation (14).

On obtient :

$$Q_s = c_p \rho_o C_{d1} A_1 \left( \frac{2g \Delta T_m H_{1u}}{T_{im}} \right)^{1/2} \Delta T_2$$

On peut résoudre l' équation en prenant en compte  $\Delta T_m$  et en introduisant :

$$\Delta T_2 = (\Delta T_2 / \Delta T_m) \Delta T_m = \varepsilon \Delta T_m$$

$$\Delta T_m = \left( \frac{Q_s / \varepsilon}{c_p \rho_o C_{d1} A_1} \right)^{2/3} \left( \frac{T_{im}}{2g H_{1u}} \right)^{1/3}$$

En éliminant  $\rho_o$ , en introduisant  $Q_{s\varepsilon} = Q_s / \varepsilon$  et en remplaçant les constantes par leurs valeurs, on obtient :

$$\Delta T_m = 7.1 \times 10^{-5} T_{im} \left( \frac{Q_{s\varepsilon}}{C_{d1} A_1} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{H_{1u}} \right)^{1/3}$$

On peut, en utilisant cette expression obtenir les vitesses d' air, le taux de ventilation et les surfaces des ouvertures en dépendance de  $Q_s$  et du facteur de stratification.

**Tableau E. 1 : Equations utilisables pour le cas de ventilation naturelle par tirage thermique avec prise en compte de la stratification**

	Formules basées sur la différence de la température Moyenne $\Delta T_m$	Formules basées sur le surplus de chaleur $Q_{s\epsilon} Q_s / \epsilon$
Conditions à l'entrée d'air : différence de pression $\Delta p_1$ (pa)	$\rho_u \Delta T_m g H_1 / T_{im}$	
Vitesse d'air $v_{c1}$ (m/s)	$\left[ \frac{2\Delta T_m g H_1}{\psi_1 T_{im}} \right]^{1/2}$	$0,038 \left[ \frac{Q_{s\epsilon} H_1}{C_{d1} A_1} \right]^{1/3} \left[ \frac{1}{\psi_1} \right]^{1/2}$
Conditions à la sortie d'air : différence de pression $\Delta p_2$ (pa)	$\rho_i \Delta T_m g H_2 / T_u$	
Vitesse d'air $v_{c2}$ (m/s)	$\left[ \frac{2\Delta T_m g H_2}{\psi_2 T_{im}} \right]^{1/2}$	$0,038 \left[ \frac{Q_{s\epsilon} H_2}{C_{d2} A_2} \right]^{1/3} \left[ \frac{1}{\psi_2} \right]^{1/2}$
Différence de température $\Delta T_m$ (K ou °C) Taux de ventilation V ( $m^3 / s$ )	$C_{d1} A_1 \left[ \frac{2\Delta T_m g H_1}{T_{im}} \right]^{1/2}$	$7.3 \times 10^{-5} \left[ \frac{Q_{s\epsilon}}{C_{d1} A_1} \right]^{2/3} \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/3}$ $0.038 (Q_{s\epsilon} H_1)^{1/3} (C_{d1} A_1)^{1/3}$
Surface de l'ouverture $A_1$ ( $m^2$ )		$6.2 \times 10^{-7} \frac{Q_{s\epsilon}}{C_{d1}} \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/2} \left[ \frac{T_{im}}{\Delta T_m} \right]^{3/2}$ $140 \frac{V^{3/2}}{(Q_{s\epsilon} H_1)^{1/2} C_{d1}}$

1 - cette équation est utilisable dans le cas où l'on cherche à atteindre une différence de température  $\Delta T_m$ .

2 - équation utilisable dans le cas d'un taux de ventilation à atteindre.

3 - la surface de la sortie d'air peut être déduite en utilisant le ration entre  $A_1$  et  $A_2$

## **Abstract**

The large glazed spaces such as atria are architectural shapes that are used by the architects in many projects. These spaces are characterized by thermal environment and air motion problems, which can cause uncomfortable situations during the summer conditions. Evidence suggests that a significant number of these spaces have major design flaws that lead to energy wastage and discomfort.

The objective of this work is to determine the thermal behavior of atrium space in our latitude, and to develop natural ventilation in the latter as a strategy of passive cooling in summer. In order to contribute to improving the atrium design adequate to our Mediterranean climate. In this context a series of in situ measurements is elaborated in the atrium of the culture house of Jijel City, during two periods, summer and winter, where several scenarios have been subject of a study on thermal-aerodynamic environment.

The interpretation of the data collected at the scene shows that, indeed in summer period the atrium constitutes a source of discomfort inside the building, illustrated by an excessive overheating and thermal stratification in the absence of a total renewal of air by natural ventilation, the incorporation of the latter allows one to lower the temperatures of air and consequently, an internal cooling of environments is felt. While, in winter the atrium reveals a bioclimatic aspect, playing the role of a solar collector, thus controlling the variations of the temperatures, and related degrees valuable for space heating.

This study is also based on a digital simulation, whose model studies in the investigation part was used as support with this study undertaken by using program "EDSL TAS program 9.1.4.2 version". Which, allows for one part, to check the results obtained by the measurement campaign. And secondly, to optimize the refreshing aspect of the two types of natural ventilation (transverse and by thermal pulling) through several scenarios. Whose results appear interesting compared to thermal comfort resulting from the combination between these two types of natural ventilation.

**Key-words:** Atrium, thermal environment, numerical modeling, thermal stratification, natural ventilation

## لمخص:

المساحات الزجاجية للقبو في المبنى لترتفع "Atrium" هـ. تُترك الواجهة مع عمارة كثيفة الاستخدام من قبل المقيمين  
المعمرات تُفقد العديد من المميزات مثل مساحات فضاء غلبت الأحياء المشككة ببيئتها الحارة، وحركة  
المواهب داخلها، لتُمكن أن يتسبب أوضاع غير مريحة لتقنيات المصنوع للحارة وبالرغم من أن هذه المساحات  
تعد جيدة من جوانب عدة، إلا أن الأثر القوي لوجود عدد كبير من هذه المساحات لها عيوباً لتتضمن مات  
الرئيسية التي تؤدي إلى إمدار الطاقة وعدم الراحة.

والهدف من هذه الدراسة هو تحديد السبل والحلول الحرارية للمساحات التي تُفقد من انخاف، وتقويم وتعزز لتتكون  
الطبيعة كالتصميم الجيد والتهوية وتلطيف الجوف للصيف. إلى هاهنا نتضمن مات الأثر والمصلحة  
لمن نحننا للحرارة الضارة لتتوسط وفاء هذا السباق أجرت سلسلة من القياسات في الموقع للتقييم أثر ومات  
تأثيرات عدة من أجل، الفصل للصيف وتلثاء، حيث نُظمت عدة سننارومات نُظمت موضوع دراسة عن البيئة  
للحرارة والذئام كالمولدة

تُجمل البيانات التي تُستخرج عن جمع القياسات التي أُجريت في المبنى تُبين لنا الهدف من المبنى هو مصدر عدم  
الراحة داخل المبنى في الصيف، وتُضحي ذلك من خلال الفرق في الحرارة والتسبب في إطلاق الحرارة للمبنى داخل  
المبنى في حالة عدم امتصاص الحرارة عن طريق التهوية الجيدة، وإدراج هذه الأخيرة من حيث تصبى درجات  
حرارة الجوف والتبريد للبيئة الداخلية ببناء فضاءات التروم تُشرف بوابها وحرارة، حيث تُعد دور  
تجميع الطاقة الشمسية، وتتنظم للتعويضات لحرارة التي تتعمل في رفع درجات الحرارة، وبالتالي تكفي للوسط.

وتستند هذه الدراسة أيضاً على الملاحظات التي أُجريت في المبنى الذي أُجريت فيه القياسات للمبنى لتتخدم  
كالمثال نموذج لدعم هذه الدراسة قبل استخدام البرنامج «EDSL TAS program version 9.1.4.2»، والذي سُمح  
لنا من ناحية، للتحقق من النتائج التي توصلت إليها في القياسات للمبنى. ومن ناحية أخرى، تم جلب البيانات  
لنا وعُمن من البيئة المحيطة به، وعرضت وتعودت عن طريق المقياس الحراري، وهذا من خلال العديد  
من السننارومات. لتُظهر نتائج جدتها في المقام هاهنا، تُخص للراحة لحرارة المبنى عن المجمع  
هذه لنا وعُمن من البيئة المحيطة به.

للتقييم المتبادل لـ: «atrium» للبيئة لحرارة، للمبنى رقم ٤، لتتضمن لاطق الحرارة، لتتكون  
الطبيعة.