

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Architecture  
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المعمارية  
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de :  
**Magistère**  
**Architecture, Formes, Ambiances et Développement Durable**

INTITULE : L'EAU COMME SOURCE D'INSPIRATION DE  
L'ARCHITECTURE ; DEVELOPPEMENT D'UNE STRATEGIE SYSTEMIQUE  
INTEGREE DE L'EAU DANS LE BATIMENT

Présenté par :  
**MELOUAH Lamia**

Soutenu publiquement le 22/06/2014

**Devant le jury composé de :**

Pr Djamel ALKAMA  
Pr Noureddine ZEMMOURI  
Dr Moussadek BENABBAS  
Dr Noureddine BELGHAR

Président.  
Directeur de mémoire.  
Examineur  
Invité

Université de Biskra  
Université de Biskra  
Université de Biskra  
Université de Biskra

*A la mémoire de mon père KHALIL: ne meurent que ceux que l'on oublie. Ton amour mon papa chéri, restera pour toujours gravé au plus profond de mon cœur.*

## Dédicace :

- **A** la mémoire de mon père Khalil, qui était heureux de me voir commencer cette expérience mais malheureusement n'est plus là pour assister à sa fin. Je te dédie, papa chéri, ce travail en témoignage de mon profond amour, estime et reconnaissance pour tout ce que tu as fait pour moi, et pour ce que tu étais. Puisse Dieu, le tout puissant, t'accueillir en son vaste paradis.

- **A** ma mère Hacina, autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer le degré d'amour et d'affection que j'ai pour toi. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toute ma vie, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Reçois, ma maman chérie, ce travail en preuve de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse Dieu, le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie.

- **A** ma grand-mère, notre joie de vivre, Que cette petite dédicace, soit l'expression de mon amour et ma reconnaissance, merci pour tes prières qui m'ont toujours accompagnée. Que Dieu te préserve, santé et longue vie inch'Allah.

- **A** ma chère sœur Mounia, son époux Samir et mes adorables neveux et nièces. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

- **A** mon frère Lotfi, sa femme Nedjoua et mes neveux et nièce chéris. Que cette dédicace vous exprime, mes meilleurs vœux et ma grande affection et estime.

- **A** mon jeune frère Mehdi, Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

- **A** toute la famille Melouah, oncles, tantes et leurs familles. Que cette dédicace vous exprime, ma profonde estime.

- **A** mon oncle Nabil, tata Naima, Imed et Hakim. Merci de nous avoir soutenus dans les moments les plus difficiles.

- **A** tous les membres de la famille Benaissa chacun par son nom. Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection et mon amour pour vous tous.

- **A** mes amis qui ont partagé avec moi le bon et le dur de cette aventure : Nadir, Manel, Fella. Merci pour vos encouragements et votre soutien.

- **A** mes collègues et compagnons de parcours: Samia, Houda, Wiam, Asma, Meriem, Chafik, Oussama, Okba, Islam et Lyes. En témoignage de l'amitié qui nous unie et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de succès et bonheur.

## Remerciements :

- Louanges à Allah, le tout puissant, qui guide nos pas et nous éclaire le chemin. Puisse cet humble travail, être d'une utilité, pour mes confrères et pour la recherche.
- En premier lieu, je tiens à remercier Professeur Zemmouri Noureddine d'avoir accepté de diriger ce travail et surtout, d'avoir partagé mon envie d'aborder ce thème en particulier malgré toutes les difficultés. Merci, pour vos encouragements et votre compréhension.
- Un très grand merci à Mr Belghar Noureddine, pour sa précieuse aide, sans laquelle, ce travail ne serait arrivé à terme.
- Ma gratitude, va à Mr Malki pour sa contribution dans cette étude.
- Mes remerciements s'adressent à : Messieurs les membres du jury ayant eu l'amabilité de bien vouloir accepter l'examen, l'évaluation et le rapport de ce travail.
- Ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation aux universités de Constantine et Biskra, chacun par son nom.
- Je remercie également, ma mère, pour son soutien, sa compréhension et patience.
- Merci à tous les membres de ma famille, frères et sœur, neveux et nièces, chacun par son nom.
- Merci aussi à mon ami, Nadir, pour son aide ses encouragements et son soutien.
- A tous mes amis et collègues, merci d'avoir partagé avec moi ces moments inoubliables et d'avoir été pour moi frères et sœurs durant toutes ces années.
- Je remercie toute personne ayant participé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Les grandes villes, développent de plus en plus fréquemment certains problèmes liés au phénomène d'îlot de chaleur urbain, comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation. La minéralisation des villes en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte contribue à ces nuisances.

L'impact direct et indirect des aménagements urbains, malgré qu'il soit souvent négligé, constitue une piste intéressante pour la régulation énergétique passive. La présence de végétation, fontaines, surface d'eau, permet d'agir sur le contexte climatique afin de réduire la sollicitation thermique d'été. Solution qui présente par ailleurs un caractère équitable et sanitaire.

L'objectif de notre étude est de comprendre et quantifier, le rôle micro régulateur de l'eau dans un fragment urbain, ainsi que l'amélioration qu'elle peut apporter sur les conditions climatiques et le confort des usagers.

Le développement de notre manuscrit dépend donc, de trois Composantes fondamentales ; l'eau comme élément de la nature, énergie renouvelable et outil d'aménagement urbain ; le bâtiment comme système complexe, qui a pour but de garantir des conditions de bien-être à ses occupants et les conditions climatiques, que le premier élément traité à savoir ; l'eau, pourrait modifier afin d'apporter une amélioration sur les températures et l'humidité qui atteignent l'enveloppe de notre système.

Afin de réaliser ce processus d'évolution, notre étude s'est décomposée en deux principales parties. La première constitue un apport bibliographique, qui traite de chacune des trois composantes citées ci-dessus. La deuxième, constitue notre contribution personnelle dans cette recherche. Des modélisations de scène urbaine simplifiée dans Ansys-Fluent, nous a permis d'établir plusieurs scénarios de comparaisons à travers lesquels nous avons cherché à évaluer d'une part l'amélioration observée des conditions climatiques en présence de dispositif d'aménagement d'eau. Et d'autre part l'étendue de cette influence sur le bâtiment à travers son enveloppe qui le clôture et a pour finalité de procurer des conditions confortables pour les occupants.

**Mots clés :** Eau, Bâtiment, Température, humidité relative, système, confort, rafraîchissement passif.

# **SOMMAIRE :**

## **SOMMAIRE**

### **INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

I.	Introduction :	2
II.	Problématique de recherche :	3
II.1	Hypothèses :	5
II.2	Objectif de la recherche :	4
II.3	Structure du mémoire :	6

### **CHAPITRE I : L'EAU, SYMBOLIQUE ET CROYANCES**

	Introduction :	11
I.	Ambivalence symbolique de l'eau:	12
I.1	L'eau dans les religions :	12
I.2	Symbolique de l'élément eau :	14
I.2.1	Chez les philosophes :	15
I.2.2	L'eau pour l'homme :	15
	<i>Synthèse</i> .....	16
II.	L'eau dans la ville :	17
II.1	L'eau à Rome :	17
II.2	Chez les Perses (Iran) .....	18
II.3	L'eau à Fès :	19
II.4	L'empire ottoman :	20
II.5	Différentes manières d'approcher l'eau dans la ville du 21e siècle :	20
II.6	Ouvrage d'adduction d'eau :	25
III.	L'évolution de l'utilisation de l'eau dans le jardin :	26
III.1	Mésopotamie et l'Egypte :	26
III.2	Rome antique :	27
III.3	Les jardins islamiques.....	27
III.4	La renaissance :	28
III.5	L'âge baroque .....	29
III.6	Au 19ème siècle.....	29
IV.	Exemples caractéristiques de l'utilisation de l'eau en architecture :	30
IV.1	Architecture musulmane en Espagne, l'Alhambra :	30
IV.2	L'eau dans les jardins de Versailles:.....	31

IV.3	Le temple d'eau (Awaji, Japon):.....	32
IV.4	Mémorial du 11 septembre : .....	33
I.	<i>Synthèse</i> : .....	34
II.	Conclusion : .....	35
<b>CHAPITRE II : RAFRAICHISSEMENT PASSIF</b>		
	Introduction : .....	39
I.	Pourquoi rafraichir passivement : .....	40
II.	Comment rafraîchir et le faire de manière passive ? .....	40
II.1	Les principes physiques .....	40
II.1.1	Les échanges par conduction : .....	41
II.1.2	Les échanges convectifs.....	43
II.1.3	Les échanges radiatifs .....	44
II.1.4	Le bilan hydrique et la diffusion de la vapeur .....	45
II.1.5	Bilan énergétique total .....	46
II.2	Les actions de rafraîchissement : .....	46
II.2.1	Minimiser les apports de chaleur .....	46
II.2.2	Evacuer le chaud .....	47
II.2.3	Apporter du frais .....	47
	<i>Synthèse</i> : .....	48
III.	Caractéristiques de l'eau:.....	49
III.1	Définition: .....	49
III.2	Sources de l'eau : .....	49
III.3	Eau, énergie renouvelable : .....	51
III.4	Le cycle de l'eau : .....	51
III.4.1	L'évaporation : .....	53
III.4.2	La saturation et la pression d'eau : .....	55
III.4.3	L'évapotranspiration : .....	55
III.5	Les propriétés physiques et chimiques de l'eau:.....	57
III.5.1	Propriétés physiques : .....	57
III.5.2	Indice de réfraction de l'eau : .....	57
III.5.3	Propriétés chimiques : .....	58
IV.	L'eau comme élément régulateur du micro climat : .....	59
IV.1	Impact d'une grande étendue d'eau : .....	59



IV.2	Le cas d'un bassin :	60
IV.3	Impact des sources ponctuelles d'eau :	61
	<i>Synthèse</i> :	62
V.	Systèmes de rafraîchissement par évaporation :	62
V.1	Les fontaines et jets d'eau :	63
V.2	Les Malqafs:	63
V.3	Tour à vent :	64
V.4	Hyper inertie des glacières:	65
V.5	Les minis jets d'eau :	65
V.6	Le ruissellement :	65
V.7	Les cascades artificielles:	66
V.8	Les Brumisateurs:	66
V.9	Le mur d'eau:	67
V.10	Toiture bassin:	68
VII.1.1	L'humidification par atomisation :	69
VII.1.2	Le système « dessiccant cooling » :	70
VII.1.3	Echangeur adiabatique:	70
V.12	Le rafraîchissement par évapotranspiration	71
V.12.1	Toiture végétale :	71
V.12.2	Mur végétal :	73
V.13	Dispositifs urbains bi-fonctionnels :	72
V.13.1	Le canal hydraulique :	73
V.13.2	Les bassins de retenue.....	74
V.13.3	Les noues .....	74
V.13.4	Chaussées drainantes :	75
	Conclusion :	76
<b>CHAPITRE III : BÂTIMENT ET CONFORT THERMIQUE</b>		
	Introduction .....	79
I.	Définition du confort thermique :	80
II.	Les paramètres du confort :	81
II.1	Paramètres relatifs à l'environnement (physiologiques):	81
II.1.1	Température de l'air :	81
II.1.2	Humidité de l'air :	81

II.1.3	Vitesse de l'air .....	82
II.1.4	Température radiante moyenne(Tr) .....	82
II.2	Paramètres relatifs à l'individu (physiques) .....	82
II.2.1	Mécanismes de thermorégulation .....	82
II.2.2	Le métabolisme .....	83
II.2.3	Les vêtements .....	84
II.2.4	Les échanges thermiques .....	85
II.2.5	Les indices de confort thermique .....	89
III.	Méthodes d'analyse bioclimatique : .....	89
III.1	Méthode d'Olgay : .....	98
III.2	Méthode de Givoni : .....	99
IV.	Confort hygrothermique : .....	100
IV.1	Humidité absolue : .....	100
IV.2	Humidité Relative ou hygrométrie : .....	100
IV.3	L'enthalpie spécifique : .....	100
IV.4	La température de rosée : .....	101
IV.5	La température humide : .....	101
IV.6	Diagramme de l'air humide : .....	101
V.	Bâtiment/ occupant et confort thermique : .....	102
	Conclusion : .....	104

## **CHAPITRE IV : INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS**

	Introduction .....	106
I.	L'échelle climatique étudiée : .....	108
II.	Influence de l'aménagement extérieur sur le microclimat urbain : .....	109
II.1	Le phénomène de L'îlot de chaleur urbain : .....	109
II.2	Morphologie urbaine : .....	110
II.2.1	Le piégeage radiatif: .....	112
II.2.2	Les effets aérodynamiques: .....	112
II.3	Les matériaux : .....	113
II.4	Arbres et aménagements végétaux : .....	114
II.5	L'eau : .....	115
	<i>Synthèse</i> : .....	115

III.	L'influence du microclimat urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment :	116
III.1	La température de l'air :	116
III.2	Les flux solaires :	117
III.3	L'influence du vent :	117
IV.	L'influence des aménagements extérieurs sur les consommations énergétiques du bâtiment :	117
IV.1	Les arbres :	117
IV.2	Les parcs :	117
IV.3	La présence de l'eau:	118
IV.4	Matériaux et couleurs:	119
	<i>Synthèse</i> :	121
V.	Les études effectuées sur le rôle microclimatique de l'eau :	121
V.1	Installations d'eau pour la création d'un microclimat urbain confortable [Nishimura N et al, 1998]:	121
V.1.1	Description et objectif de l'étude :	121
V.1.2	Méthode adoptée :	121
V.1.3	Résultats obtenus :	122
V.2	Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : Influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs [Mirela Robitu, 2005]:	123
V.2.1	Description et objectif de l'étude :	123
V.2.2	Méthode adoptée :	123
V.2.3	Résultats obtenus :	124
V.3	Le rôle de la végétation et l'eau dans la création d'un microclimat urbain [Ballout. A, 2010]:	126
V.3.1	Description et objectif de l'étude :	126
V.3.2	Méthode adoptée :	126
V.3.3	Conclusion de l'étude :	128
V.4	La recherche de Termotecina Group (1987,192) ‘‘Exposition de Séville’’ ..	128
	Conclusion :	130
<b>CHAPITRE V : PROCESSUS MÉTHODOLOGIQUE</b>		
	Introduction :	133
II.	Analyse climatique de la wilaya de Biskra :	134
II.1	La température :	135
II.2	L'humidité relative:	135

II.3	Le vent :	136
II.4	Les précipitations :	137
II.5	Durée d'insolation :	137
II.6	L'évaporation :	137
II.7	Calcul de l'indice d'aridité:	137
	<i>Synthèse</i> :	138
III.	Pourquoi avoir choisi la simulation ?	139
IV.	Présentation du code CFD "Fluent" :	139
IV.1	Equations de base de Fluent :	140
IV.1.1	L'équation de conservation de la masse ou équation de continuité :	141
IV.1.2	L'équation de conservation du mouvement :	141
IV.1.3	L'équation de conservation de l'énergie :	142
IV.1.4	Modélisation de la turbulence :	142
IV.1.5	La modélisation des transferts d'humidité :	143
V.	Présentation du modèle d'étude.....	143
V.1	Choix de la scène urbaine :	143
V.1.1	Premier cas :	144
V.1.2	Deuxième cas :	145
V.1.3	Troisième cas :	147
V.1.4	Les bâtiments :	147
V.1.5	Espace extérieur :	149
V.1.6	Le jet d'eau :	149
VI.	Etapas de la simulation :	150
VI.1	Création de la géométrie :	151
VI.2	Choix du maillage :	151
VI.3	Modélisation sur fluent :	152
VI.4	Procédure de simulation:	153
VII.	Etude de cas :	153
VII.1	Etude du 1 <sup>e</sup> cas :	153
VII.2	Etude du 2 <sup>e</sup> cas :	153
VII.3	Etude du 3 <sup>e</sup> cas :	154
	Conclusion :	157

## CHAPITRE VI : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Introduction :	159
<i>Rappel</i> :	160
III. Analyse et interprétation des résultats :	160
VII.4 Interprétation des résultats du 1 <sup>e</sup> cas :	161
VII.4.1 La température :	161
VII.4.2 Humidité relative :	163
VII.4.3 Ecoulement de l'air :	164
VII.5 Interprétation des résultats du 2 <sup>e</sup> cas :	167
VII.5.1 La température :	167
VII.5.2 L'humidité relative :	168
VII.5.3 Vitesse d'écoulement de l'air :	169
VII.6 Interprétation des résultats du 3 <sup>e</sup> cas :	170
VII.6.1 vitesse de l'air :	170
Conclusion :	175
Discussion : <i>L'influence des résultats obtenus sur le bien-être des occupants et la consommation énergétique dans les bâtiments</i> :	177
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE :</b>	
Conclusion générale :	182
Perspectives de recherche :	189
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :</b>	191
<b>ANNEXES</b> :	198

## LISTE DES FIGURES :

### *Chapitre I:*

Fig. n°I.1 : Illustration : l'eau, reflet du ciel et de la beauté de la nature .....	10
Fig n°I.2: Peinture flamande le baptême du Christ par Lambert Sustris .....	14
Fig n°I.3 : L'arche de Noé, vitrail du XVII e siècle, église Saint-Etienne du mont.....	14
Fig n° I.4 : Mosquée du shah, Ispahan .....	14
Fig. n°I.5 : Thermes Romain Italie .....	18
Fig n° I .6 : Fontaine de la trévie, Rome .....	18
Fig n° I.7 : Grande fontaine, style baroque, Istanbul.....	20
Fig n° I.8: Water, trees and the feeling of the place, barrage à Istanbul .....	20
Fig n°I.9: Aqueduc en cours de construction .....	25
Fig n°I.10 : Foggara, Adrar Algérie .....	25
Fig n°I.11 : Le porteur d'eau .....	25
Fig n°I.12 : Canalisations en bois et plomb.....	25
Fig n°I.13 : Château d'eau .....	26
Fig n°I.14 : Château d'eau pensé comme un bâtiment.....	26
Fig n°I.15 : Bassin d'eau dans le jardin égyptien .....	27
Fig n°I.16 : Jardin de Babylon.....	27
Fig n°I.17 : Jardin de casa de la vetti, Pompéi, Italie .....	27
Fig n°I.18 : Fontaine et Mosaïque de Neptune et d'Amphitrite à Herculaneum .....	27
Fig n°I.19 : les escaliers d'eau-Généralife- .....	28
Fig n°I.20 : jardin de fine, kâchân, Iran.....	28
Fig n°I.21 : Jardin de Châhzâdeh - Kermân, Iran.....	28
Fig n°I.22 : jardin du Taj Mahal, inde .....	28
Fig n°I.23 : fontaines des dragons, villa Este, Italie .....	29
Fig n°I.24 : rampe des escaliers, villa Este, Italie .....	29
Fig n°I.25 : l'eau miroir de l'architecture, bassin du partal.....	31
Fig n°I.26 : cour et fontaine des lions, image du paradis .....	31
Fig n°I.27 : bassin du char d'Apollon durant les grandes eaux musicales .....	31
Fig n°I.28 : bassin du char d'Apollon .....	31
Fig n°I.29 : le Parre-terre d'eau, Versailles .....	32
Fig n°I.30 : entrée du temple percée au milieu de l'étang.....	33
Fig n°I.31 : temple Honpuku-Ji, Japon.....	33

Fig n°I.32 : chutes d'eau- Reflecting absence-.....	34
Fig n°I.33 : deux percements, lieux des chutes d'eau à l'emplacement du mémorial .....	34

### *Chapitre II:*

Fig n°II.1 : utilisation de l'eau pour rafraîchissement 'brumisateurs au niveau d'El harem el Cherif, Arabie saoudite .....	38
Fig n°II.2 : Ressources en eau .....	50
Fig n°II.3 : Moulin à eau .....	52
Fig n°II.4 : Moulin à marée .....	52
Fig n°II.5 : Centrale hydroélectrique.....	52
Fig n°II.6 : Le cycle d'eau .....	53
Fig n°II.7 : Diagramme de phase de l'eau .....	57
Fig n°II.8 : Géométrie de ma molécule d'eau .....	58
Fig n°II.9 : Transferts thermiques d'un bassin .....	60
Fig n°II.10 : Bassin avec jets d'eau à Séville .....	63
Fig n°II.11 : Fontaine au cœur d'une maison .....	63
Fig n°II.12 : Exemple de malqaf avec déflécteurs .....	64
Fig n°II.13: Exemple de Malqaf .....	64
Fig n°II.14, 15 : Variantes et détails de déflécteurs .....	64
Fig n°II.16 : Tour à vent avec bassin pour refroidissement .....	65
Fig n°II.17 : Capteur d'air, dawlat abad, Yazd, Iran .....	65
Fig n°II.18 : Mini jets d'eau au parc André Citroën paris 7.....	66
Fig n°II.19 : Effet de ruissellement .....	66
Fig n°II.20, 21 : Exemples de cascades artificielles .....	67
Fig n°II.22 : Différentes utilisations de brumisateurs .....	68
Fig n°II.23 : Mur d'eau.....	68
Fig. n°II.24 : principe de fonctionnement d'un toit bassin.....	69
Fig. n°II.25 : graphe illustrant l'efficacité d'un toit d'eau (en bleu) en comparaison avec d'autres types de toitures. ....	69
Fig n°II.26 : Schéma d'installation du déssicant cooling .....	70
Fig n°II.27 : Principe de l'échangeur adiabatique .....	71
Fig n°II.28 : Terrasse végétale.....	72
Fig n°II.29: Toiture végétale 'school of art design and media' ,Singapour .....	72
Fig n°II.30: Couches composantes d'une toiture végétale .....	72

Fig n°II.31: Coupes sur mur végétal.....	73
Fig n°II.32 : Mur végétal du musée du quai, Branly. Paris .....	73
Fig n°II.33 : Canal hydraulique, Téhéran, Iran .....	74
Fig n°II.34 : Canal hydraulique, Chiraz, Iran .....	74
Fig. n°II.35 : Bassin de retenue, France .....	74
Fig n°II.36 : Exemples de bassin de retenue .....	74
Fig n°II.37: Noue, France .....	75
Fig n°II.38: Chaussée drainante .....	75
Fig n°II.39: Tranchée drainante.....	75

### *Chapitre III:*

Fig n°III.1:Illustration: eau, couleur, ciel et paysage .....	78
Fig n°III.2 : Production de la chaleur .....	84
Fig n°III.3 : Différents types d'échanges thermiques.....	85
Fig n°III.4 : Asymétrie du rayonnement et asymétrie .....	90
Fig n°III.5 : Zone de confort pour la nouvelle température effective.....	93
Fig n°III.6 : Diagramme bioclimatique d'Olgay .....	98
Fig n°III.7 : Diagramme psychométrique de Givoni.....	99
Fig n°III.8 : Diagramme de l'air humide.....	102
Fig n°III.9 : Représentation du système : occupant- bâtiment .....	103

### *Chapitre IV:*

Fig n°IV.1 : Fontaine sèche Citroën et son système hydraulique.....	106
Fig n°IV.2 : Echelle climatique étudiée .....	108
Fig n°IV.3 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain.....	109
Fig n°IV.4 : Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local.....	111
Fig n°IV.5 : Le phénomène de piégeage urbain radiatif d'après Estournel .....	112
Fig n°IV.6 : Profils verticaux des vitesses de vent en fonction de la puissance au dessus de trois terrains de rugosité différentes .....	112
Fig n°IV.7 : Effets aérodynamiques types.....	113
Fig n°IV.8 : Photo et thermographie IRT des revêtements testés dans l'étude de Doulos et al .....	113
Fig n°IV.9 : Influence des arbres sur l'humidité et la température de l'air dans des quartiers résidentiels.....	114



Fig n°IV.10 : Accroissement de l'îlot de chaleur urbain par la puissance dissipée des systèmes de génie climatique .....	116
Fig n°IV.11 : Transmission solaire.....	118
Fig n°IV.12 : Schématisation de l'effet de la lumière d'un couvert végétal .....	118
Fig n°IV.13 : Installation d'eau étudiée .....	122
Fig n°IV.14 : Système étudié et point de mesure .....	122
Fig n°IV.15 : Résultats obtenus.....	122
Fig n°IV.16: Square Fleuriot Nantes .....	123
Fig n°IV.17: Modélisation des 03 cas sur SOLENE .....	124
Fig n°IV.18 : Position des points de mesure .....	124
Fig n°IV.19 : Valeurs de température de surface à 12h .....	125
Fig n°IV.20 : Valeurs de l'humidité relative de l'air à 1.5m du sol .....	126
Fig n°IV.21 : Les quatre stations reportées sur le site.....	126
Fig n°IV.22: Coupe schématique du système de refroidissement de la rotonde, Séville.....	129
Fig n°IV.23 : Tour de refroidissement .....	129
Fig n°IV.24 : Brumisation de la végétation.....	129
Fig n°IV.25 : Effets climatiques de rafraîchissement par humidification utilisé à Séville .....	129

### *Chapitre V:*

Fig. n° V.1 : Zones climatique d'hiver, Algérie.....	134
Fig. n° V.2 : Zones climatique d', Algérie .....	134
Fig. n° V.3 Température de l'air extérieur. Période « 1997-2007».....	135
Fig. n° V.4 : Humidité relative (%) période « 1997-2007» .....	136
Fig. n° V.5: Vitesse du vent (m/s) période « 1997-2007» .....	136
Fig. n° V.6: Précipitation en (mm) période « 1997-2007» .....	137
Fig. n° V.7: Vue en plan de la scène urbaine. '1e cas' .....	145
Fig. n° V.8: Vue en plan de la scène urbaine. '2e cas' .....	146
Fig. n° V.9: Volumétrie de la scène urbaine. '2e cas' .....	146
Fig. n° V.10: vue en plan de la scène urbaine. '3e cas' .....	147

Fig. n° V.11 : Vue de face de la scène urbaine (Hauteurs, distances). .....	148
Fig. n° V.12 : Schématisation du jet d'eau .....	149
Fig. n° V.13 : Composantes de la scène urbaine .....	150
Fig. n° V.14 : Maillage de la géométrie urbaine (Type hybride raffiné au niveau des bâtiments et jet d'eau). .....	151
Fig. n° V.15 : Schématisation des étapes de modélisation. ....	152
Fig. n° V.16 : Scénarios de comparaison “ 3 <sup>e</sup> cas” .....	154
Fig. n° V.17: Récapitulatif des cas d'études .....	155

### *Chapitre VI:*

Fig. n° VI.1 : Valeurs de températures aux frontières de la canopée (1e cas) .....	161
Fig. n° VI.2 : Valeurs de l'humidité relative aux frontières de la canopée (1e cas) .....	163
Fig. n° VI.3 : Trajectoires d'écoulement de l'air (1e cas) .....	165
Fig. n° VI.4 : Trajectoires d'écoulement de l'air (1e cas) .....	166
Fig. n° VI.5 : Valeurs de la température au sein du fragment urbain (2e cas) .....	167
Fig. n° VI.6 : Valeurs de l'humidité relative au sein du fragment urbain (2e cas) .....	168
Fig. n° VI.7 : Vitesse de l'air au sein du fragment urbain (2e cas) .....	169
Fig. n° VI.8 : Vitesse de l'air (2e cas) .....	170
Fig. n° VI.9 : Vitesse du vent (3e cas) .....	171
Fig. n° VI.10 : Mouvement de l'air (3e cas) .....	171
Fig. n° VI.11 : Vitesse d'écoulement de l'air à des hauteurs différentes de la zone 01 avec jet d'eau (3e cas) .....	172
Fig. n° VI.12 : Vitesse d'écoulement de l'air au niveau des enveloppes des bâtiments (3e cas) .....	173
Fig. n° VI.13 : Champ de pressions (3e cas) .....	174
Fig. n° VI.13 : Concentration des masses (3e cas) .....	174

## LISTE DES TABLEAUX :

### *Chapitre II:*

Tab n°I.1: Tableau récapitulatif, formes de dialectique eau/ville .....	24
---	----

### *Chapitre II:*

Tab n°II.1: Paramètres a, n et b en convection naturelle .....	43
--	----

Tab n°II.2 : Paramètres a, n et b en convection forcée.....	44
---	----

Tab n°II.3 : Principes de rafraichissement associés aux différents systèmes.....	47
--	----

### *Chapitre III:*

Tab n°III.1: Métabolisme thermique et énergie mécanique .....	83
---	----

Tab n°III.2 : valeurs de résistances propres ICL de quelques vêtements.....	84
---	----

Tab n°III.3 : valeurs moyennes (hommes et femmes) d'ICL.....	85
--	----

Tab n°III.4 : échanges par convection.....	87
--	----

Tab n°III.5 : correspondance entre SET et l'état psychologique.....	93
---	----

Tab n°III.6 : Débit sudoral, mouillure cutanée et confort .....	94
---	----

Tab n°III.7 : indices DISC.....	94
---------------------------------	----

Tab n°III.8 : exemples de valeurs de l'indice PET pour différents scénarios .....	96
---	----

Tab n°III.9 : domaine de l'indice de confort thermique PET pour différentes catégories de la perception thermique des êtres humains .....	96
---	----

Tab n°III.10 : valeurs limites du WBGT en fonction du métabolisme .....	97
---	----

### *Chapitre IV:*

Tableau IV.1 : Propriétés radiométriques de quelques surfaces.....	120
--	-----

# **Introduction générale :**

## **I. Introduction :**

L'intervention de l'homme sur le sol et la forte urbanisation ont eu des conséquences immédiates sur le climat et la qualité de l'air. Elles constituent les causes principales d'un nombre de problèmes microclimatiques, dont le plus connu est l'îlot de chaleur urbain. Cette augmentation excessive des températures par comparaison à celles obtenues en zones rurales proches, entraîne des perturbations aussi bien au niveau du confort qu'au niveau des consommations énergétiques et des nuisances qui lui sont associées.

Par le passé, de nombreuses solutions ont été définies et ont été proposées et qui correspondent à une urbanisation raisonnée ou ajustée par rapport aux contraintes thermiques. De nos jours, la multiplication des surfaces minérales ou vitrées, les activités humaines et les nouvelles structures des villes, ont considérablement évalué, rendant inadaptées les préconisations liées au bon sens [Vinet. J, 2000]. Des mesures de compensations sont alors à apporter.

Ce constat, nous incite à essayer de mieux comprendre comment le bâtiment est affecté par les conditions climatiques et comment il agit sur ceux là en retour. Le bâtiment par sa fonction et les éléments qui le composent, peut être considéré comme un système qui a pour but d'assurer le confort et le bien être de ses occupants.

Les surconsommations énergétiques sont aussi, causes et effet d'un certain nombre de problèmes ; pluie acide, détérioration de la couche d'ozone, etc. la réalité de la dégradation environnementale est devenue plus concrète et les soucis écologiques prédominants.

La résolution de ce problème requiert des actions de longue durée pour un développement durable. Sous cette perspective, les ressources d'énergies renouvelables paraissent comme la solution la plus efficace.

L'eau, constitue plus des 2/3 de la surface totale de la planète terre. Ses propriétés sont tout à fait exceptionnelles ; condition de vie, solvant quasi universel, puissant régulateur thermique [Universalis 2012]. Sa disponibilité est l'une des clés de distribution des êtres vivants à la surface de la terre. Au-delà de ses fonctions vitales et sanitaires, l'eau est aussi un élément universel du paysage, elle contribue à sa formation par ses immenses forces d'érosion et peut lui apporter une vie immédiate par son mouvement, son bruit, sa transparence, etc. Elle crée ainsi, différents types d'atmosphères.

Dans les rapports entre l'architecture, l'urbanisme et l'eau, il est aisé de démontrer l'influence évidente de cet élément naturel dans notre environnement. Les stratégies des

aménageurs pour la transporter ou la mettre en valeur dans la ville sont diverses. Cependant, le rôle de l'eau en ville reste beaucoup plus complexe.

L'eau tout comme la végétation, peuvent constituer des matériaux d'aménagements urbains très efficaces. Plusieurs recherches, se sont intéressées à la quantification de cet effet, nous en citons quelques unes tout au long du développement de notre étude. C'est principalement, dans cette optique que s'inscrit notre problématique.

## **II. Problématique de recherche :**

Les villes sont des agrégations de constructions, de mobilier urbain, d'éléments végétaux et de surfaces naturelles et artificielles disposées de manière hétérogène.

Leur densification, conjuguée aux modes actuels d'urbanisation contribuent largement à l'augmentation des températures d'air et des surfaces par rapport à celles constatées dans les zones rurales. On assiste à une forte minéralisation des villes et remplacement des espaces verts et surfaces perméables par des aires bétonnées.

De plus, les perturbations aérodynamiques liées à la rugosité d'ensemble, les mouvements atmosphériques d'air et d'énergie sont modifiés localement par cette hétérogénéité présente dans la canopée urbaine [Bouyer. J, 2009].

Le phénomène d'ICU (Îlot de Chaleur Urbain), est défini comme l'écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante. Ce phénomène est responsable d'un ensemble de problèmes ; la pollution de l'air, de l'eau, modification du bilan énergétique local, entraînant ainsi, une modification des conditions de confort et l'augmentation de la consommation énergétique des bâtiments. Plus de 40% de l'énergie consommée, est utilisée dans les bâtiments et cette consommation est l'une des causes principales des émissions des gaz à effet de serre.

En quête de solutions qui puissent atténuer l'effet nocif de la forte urbanisation et l'utilisation des énergies fossiles, il devient impératif d'appréhender les bons scénarios dès les premières phases de conception et aussi, favoriser le recours aux énergies renouvelables et l'adoption des systèmes passifs.

Dans ce contexte, les recherches ont démontré que ; malgré qu'il soit souvent négligé, l'impact direct et indirect des aménagements urbains constitue une piste intéressante pour la régulation énergétique passive. Les plantations, parc, étendue d'eau, présents dans la ville, modifient les conditions climatiques à une échelle locale et par conséquent permettent une économie d'énergie.

La tendance écologique, encourage l'exploitation raisonnée des opportunités que nous offre la nature. Le soleil, l'eau et le vent sont à présent des sources d'énergie qui donnent leurs preuves à différentes échelles et dans différents domaines.

L'eau est un élément primordial de la nature et qui conditionne la survie de toutes les espèces vivantes. Son caractère renouvelable reste sujet de discussions, mais les précipitations annuelles assurent jusque là, sa disponibilité.

L'homme et depuis la nuit des temps a développé différentes pratiques de l'eau. Par ses vertus et ses qualités physiques, le cadre sonore et l'ambiance générée par son mouvement, l'eau, intéressa les anciens bâtisseurs et a souvent nourri l'imaginaire des architectes pour des projets où le liquide et le solide se complètent ou s'opposent pour construire des habitations, monuments, jardins, etc.

Les fontaines sont les plus anciens modèles de dispositifs d'eau employés à l'échelle urbaine et dans les espaces d'habitation. Leur présence était pour non seulement, embellir mais aussi pour refroidir par évaporation, particulièrement en climat chaud et sec.

L'eau passe de son état liquide à la vapeur en soutirant une énergie importante à l'air qui est estimée à 2450 KJ par 1Kg d'eau évaporée. Ainsi une importante part des apports énergétiques est perdue sous forme de chaleur latente, ce qui provoque un abaissement de la température de l'eau. Ensuite le flux de chaleur sensible tend à équilibrer l'écart de température entre la surface de l'eau et l'air. C'est ce mécanisme qui provoque un rafraichissement de l'air.

Il est donc clair que L'eau possède, un potentiel de rafraichissement, provoqué par le processus d'évaporation. Ce qui nous mène à poser deux questions primordiales :

-Peut-on obtenir des améliorations réellement quantifiables des caractéristiques microclimatiques des espaces urbains par l'introduction de dispositifs d'eau ?

-Et aussi, les conséquences induites par cette modification du microclimat sont-elles significatives en termes de pratique quotidienne du confort ?

Notre hypothèse de départ considère le bâtiment comme un système qui a pour but de garantir le bien être de ces occupants. Sa définition consiste ainsi à identifier sa frontière, à travers laquelle, il échange matière énergie et/ou information avec son environnement par rapport à la finalité de procurer un environnement intérieur favorable aux activités des occupants.

La frontière du système bâtiment est l'enveloppe qui réalise sa clôture [Moujalled. B, 2007]. Celui-ci étant en interaction avec un environnement extérieur et un environnement

intérieur “ l’occupant”. Le bâtiment est considéré comme inscrit dans un environnement plus ou moins urbanisé.

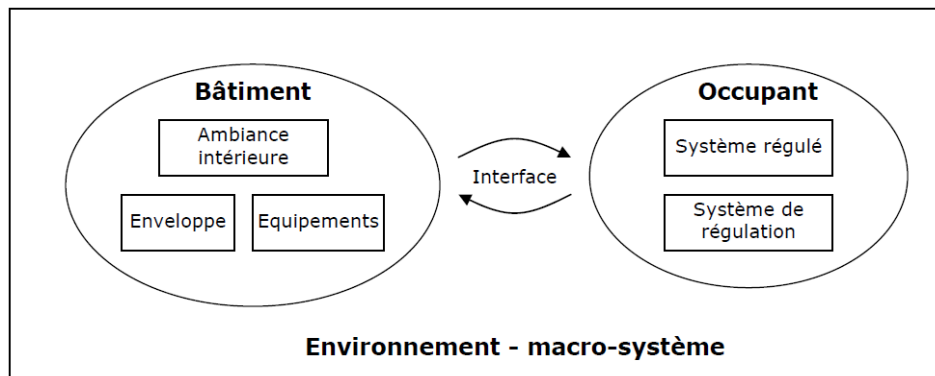


Fig. n°0.1 : Représentation du système Occupant-Bâtiment. Source: Moujalled. B, 2007

## II.1 Hypothèses :

Nous posons les hypothèses suivantes :

### **1/L’eau en tant qu’élément mobile peut générer plusieurs ambiances :**

En Pensant l’eau il ne convient pas de s’arrêter à son rôle biologique et de s’attarder dans les coulisses de sa mise en scène technique, il est nécessaire de poser la question du sens que cet élément naturel recouvre.

L’effet sonore, le mouvement de l’eau sa pureté, tous ces éléments peuvent générer des différences de perception et d’appréciation, une différence d’ambiance qui aurait impact sur la qualité de vie des occupants de l’espace.

### **2/L’utilisation de l’eau à l’échelle microclimatique pourrait créer des ambiances climatiques diverses :**

L’eau, peut contribuer au rafraîchissement de l’air, en l’humidifiant par la vaporisation. Elle possède aussi, des propriétés intéressantes en ce qui concerne sa masse volumique et sa capacité thermique, chose qui peut engendrer une amélioration des conditions microclimatiques. Ainsi l’eau, présente en espace urbain, peut jouer le rôle d’élément micro régulateur, créateur d’une variété d’ambiances thermiques.

## II.2 Objectif de la recherche :

Les deux objectifs fondamentaux et qui orientent l’évolution de cette étude sont :

-Etablir des connaissances sur le rapport qu’entretiennent les hommes avec l’eau à travers l’histoire et l’impact de ce rapport sur l’espace urbain et architectural.



-Comprendre et quantifier, le rôle micro régulateur de l'eau dans un fragment urbain, ainsi que l'amélioration qu'elle peut apporter sur les conditions climatiques et le confort des usagers.

Pour atteindre notre premier objectif, un important apport bibliographique viendra enrichir nos connaissances. On essaiera de comprendre le rapport qu'entretient l'homme avec l'eau, et l'impact de ce rapport sur l'espace urbain et architectural.

L'eau porte une riche symbolique, qu'on retrouve partout dans le monde, chose qui lui a permis de prendre place dans le quotidien des individus et leurs espaces de vie. En tant qu'architectes, il serait intéressant qu'on puisse savoir d'avantage sur l'évolution de cette existence, comprendre le rôle qu'elle accomplit et surtout comprendre ses qualités pour mieux l'approcher. Car l'eau pourrait constituer un intéressant outil d'architecture.

Pour atteindre notre deuxième objectif, on aura à quantifier l'amélioration qu'apporte la présence de dispositif d'eau à une échelle urbaine sur les conditions climatiques extérieures et son influence sur le confort intérieur des bâtiments.

L'eau, comme nous l'avons déjà présenté ci-dessus, par le processus d'évaporation, soustrait à l'air des quantités importantes d'énergie, ce qui implique une réduction de la température de l'air. Cependant, les études ont démontré que ce changement d'état reste tributaire d'un ensemble de paramètres ; climatiques, physiques, surface de contact air/eau, etc.

Ce sera à l'échelle du fragment urbain (l'ordre de grandeur du domaine d'étude correspond à l'échelle microclimatique) que nous étudierons, la mise en place du dispositif d'eau et que nous évaluerons son impact sur les conditions microclimatiques.

Pour se faire, et vu la complexité de ce genre d'interactions, nous avons opté pour l'utilisation du code CFD, Ansys Fluent.

### **II.3 Structure du mémoire :**

La présente étude sera développée suivant deux principaux axes, le premier concerne les aspects et apports théoriques de l'étude, le second relève du stade de la pratique, choix d'un cas d'étude et l'aborder selon une méthode et technique adéquates afin d'en ressortir des résultats qui pourront infirmer ou confirmer nos hypothèses de départ :

Dans le premier chapitre, nous aborderons les dimensions symboliques de l'eau. Cette ambivalence nous permettra de comprendre le rapport qu'entretiennent les hommes avec cet élément. Un rapport qui pourrait avoir une influence sur l'espace de vie et sur la

perception de l'ambiance dans cet espace. L'eau est un élément très riche en valeurs ; synonyme de vie, est sans doute l'association la plus courante et la plus évidente à travers le monde, mais l'eau n'est pas juste cet élément vital. Par sa forme, transparence, réflectivité, couleur, mouvement et bruit, l'eau constitue un outil des plus favorables pour le concepteur. Sa mise en scène nécessite une compréhension de son caractère et l'appréciation de ses atouts.

Dans le deuxième chapitre, nous développerons les principes du rafraîchissement passif, passant en revue les éléments nécessaires à la bonne compréhension des phénomènes de transferts de chaleur et de masse en milieu urbain (échanges radiatifs, convectifs, conductifs, bilan hydrique et bilan énergétique total). Pour arriver à la fin, aux différentes stratégies qui puissent être adoptées.

La stratégie de rafraîchissement par humidification, tire son profit du phénomène d'évaporation de l'eau qui possède aussi de nombreuses qualités. L'eau sera par la suite abordée en tant qu'élément de régulation du microclimat. Des informations sur l'impact des zones étendues d'eau et des sources ponctuelles et un exemple de modélisation d'un bassin seront présentés.

Un rappel sur la notion du confort, dans le troisième chapitre, nous permettra de comprendre la complexité et la pluridisciplinarité de cette notion. Nous abordons le confort thermique par l'analyse des paramètres relatifs à l'environnement et à l'individu. Les échanges thermiques (par rayonnement, convection, respiration, diffusion et sudation) seront détaillés, ainsi que les indices de confort ou de stress thermique.

Le quatrième chapitre, est un rappel des différentes interactions ; microclimat-aménagement urbain et bâtiment. Nous essayerons de comprendre les influences interchangées entre le bâtiment et le microclimat urbain et les alternatives proposées aux problèmes qui en résultent. Entre autre, l'adoption de dispositif d'eau pour amélioration des conditions climatiques.

La deuxième partie du manuscrit qui constitue la partie pratique de notre étude, s'étale sur deux chapitres. Dans le premier, nous présenterons au départ, la ville de Biskra dont les données climatiques seront utilisées dans notre travail de simulation. Les différentes étapes que nous avons suivies seront détaillées, ainsi qu'une présentation du logiciel Fluent et ses principes de base.

Dans le sixième chapitre, nous présenterons les résultats des simulations, et des différents scénarios de comparaison, pour arriver à répondre aux hypothèses de notre recherche. Ce chapitre sera suivi d'une conclusion générale de l'étude.

# **CHA PITRE **I**:**

**L'eau, symbolique et croyances**



Fig. n°I.1 : Illustration ; l'eau, reflet du ciel et de la beauté de la nature. Source : <http://www.linternaute.com>

*“ On ne peut pas déposer l'idéal de pureté n'importe où, dans n'importe quelle matière. Si puissants que soient les rites de purification, il est normal qu'ils s'adressent à une matière qui puisse les symboliser. L'eau claire est une tentation constante pour le symbolisme facile de la pureté. Chaque homme trouve sans guide, sans convention sociale, cette image naturelle.”*

G. Bachelard, *L'eau et les rêves*

## **Introduction :**

Ce premier chapitre, nous l'avons voulu introductif à l'univers de l'eau, avec toutes ses dimensions, afin de pouvoir comprendre la relation qu'entretiennent les hommes avec cet élément de la nature et l'étendue de ce rapport sur l'espace vécu.

Considérée comme un des quatre éléments constitutifs de l'univers, l'eau se trouve sur la planète terre sous plusieurs formes : eau de pluie, eau salée, eau tumultueuse des rivières, eau solidifiée en glace, vapeur, etc. Elle constitue une condition nécessaire à la vie. Cette association est sans doute la plus courante, la plus évidente et la plus partagée à travers le monde. Mais l'eau est chargée de beaucoup plus de valeurs et symboliques, chose que nous allons découvrir dans la première partie du chapitre.

Dans la deuxième partie, quelques périodes de l'histoire de l'eau dans la ville seront retracées. Nous verrons ainsi l'évolution de la place de l'eau et les formes de son intégration dans l'espace de vie; urbain et architectural.

## I. Ambivalence symbolique de l'eau:

### I.1 L'eau dans les religions :

Ce bref aperçu sur l'importance de l'eau dans les religions les plus répandues au monde- les religions du livre plus précisément- a pour objectif de faire ressortir l'influence de ces croyances sur l'homme, et qui a fait de l'eau la source de plusieurs rituels religieux qui habitent les continents. Cette influence s'est traduite même dans l'espace architectural ; d'où son intégration -l'eau- sous plusieurs formes et à différentes échelles.

Le rôle de l'eau est toujours fondamental non seulement dans les systèmes de pensées qui régissent respectivement le Judaïsme, Christianisme et Islam, mais aussi dans les rites qui leur sont spécifiques.

Dans le judaïsme, l'eau est l'élément purificateur par excellence, le lavage rituel et l'eau bénite sont indispensables pour maintenir l'état de pureté. En évoquant l'événement miraculeux de Moïse et sa traversée de la mer rouge, l'eau devient synonyme de puissance, punition mais aussi élément de bénédiction pour ceux qui là méritent.

Dans le christianisme, les pratiques baptismales par immersion, aspersion ou effusion font de l'eau un élément saint, béni. Pluie, déluge, torrents, sources, fontaines, mer, toutes ces formes prises par l'eau ont dans la Bible un sens propre ou métaphorique et des fonctions spécifiques. « *Une dialectique y est déjà solidement ancrée : l'eau, créature de Dieu, bienfait divin, peut également se révéler force destructrice; présente, elle est source de vie et régénératrice, mais son absence signifie : sécheresse et mort* » [Bouguerra. M-L, 2006]

L'islam à son tour apparaît et se répand, en tant que religion et conception du monde, dans une série de zones semi-désertiques où le problème de l'eau était crucial. Un ensemble de versets et hadiths évoquent l'importance de cet élément. Mais aussi tracent pour les croyants un ensemble de mesures voir lois pour une bonne gestion et une eau pour tous.

Le Coran confirme la thèse biblique de la création de la vie [Hidiroglou. P, 1994], dans la mesure où Dieu a créé tous les êtres vivants à partir de l'eau après avoir séparé la terre et les cieux : Al-Anbia, verset 30 : “...وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ” ; *Nous avons désigné de l'eau toute chose vivante*. On trouve encore deux références au moins aux bienfaits de l'eau dans le livre saint. Les musulmans s'attacheront d'abord à la fonction purificatrice de l'eau pour les ablutions qui rythment leur quotidien, la détermination de la pureté rituelle et la fonction de siqaya est une tâche aristocratique [Bouguerra. M-L, 2006]. Et l'on sait l'importance de l'eau de la source de Zem Zem et sa symbolique jusqu'à nos jours.

L'eau est aussi symbole de fécondité et le Coran ne manque pas de le rappeler

"هُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لَكُمْ مِنْهُ شَرَابٌ وَمِنْهُ شَجَرٌ فِيهِ تُسِيمُونَ {10} يُنبِتُ لَكُمْ بِهِ الزَّرْعَ وَالزَّيْتُونَ وَالنَّخِيلَ  
وَالْأَعْنَابَ وَمِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ {11}"

Nous faisons descendre du ciel une eau bénie grâce à laquelle nous faisons croître les jardins ; le grain que l'on moissonne ; les palmiers élancés porteurs de régimes bien ordonnés pour nourrir nos serviteurs". Al-Nahl, versets, 10-11.

Dans un autre contexte, dans la conception musulmane la propriété générale, que ce soit de la terre ou encore de l'eau, tout appartient à Dieu et doit être géré comme un usufruit dans l'intérêt général. La communauté de l'eau, le partage avec tous les êtres vivants, le droit d'irrigation et bien d'autres thématiques étaient régis par des jurisprudences ayant comme sources les versets coraniques, hadiths ou les écoles d'interprétation.

Il est aussi important de rappeler que dans le coran et par conséquent pour les musulmans, il y a bien sûr la vie sur terre mais aussi l'au-delà. Là encore l'eau est meilleure récompense que dieu fait aux croyants et à ceux qui ont fait des œuvres pies "des paradis sous lesquels l'eau court".

Ainsi, chacune des cultures monothéistes a développé à sa manière des rites religieux, des pratiques sociales, des systèmes philosophiques qui se fondent sur un patrimoine d'images et de références communes, consignées certes dans des textes saints, mais aussi dans l'art ou dans l'architecture.

Les fleuves du paradis, le déluge, Moïse sauvé des eaux, la traversée de la mer Rouge, Jonas dans la baleine, tous ces thèmes et bien d'autres ont façonné durablement l'imaginaire chrétien : on peut en apprécier encore le charme en Occident, à travers la sculpture romane, les enluminures, les vitraux des cathédrales gothiques, la peinture flamande ou italienne et, en Orient, à travers la décoration des premières églises, des baptistères, des mosaïques ou des fresques byzantines.[ Hidiroglou. P, 1994]

Quant aux bassins à ablutions des musulmans, inséparables des mosquées<sup>1</sup>, leur architecture rythme l'immensité du monde islamique des premiers lieux de prédication du prophète Mohamed (QSSL) - Médine et La Mecque - aux contreforts de l'Empire moghol, de l'Espagne médiévale à l'Afrique contemporaine.

---

<sup>1</sup> L'exemple de la mosquée du shah : "par l'effet conjugué du miroitement des surfaces émaillées et leur reflet sur l'étendue d'eau immobile du bassin central d'ablution, l'architecture réelle trouve un complément dans une image virtuelle qui confère toute sa perfection cristalline à ce monument" [Henri Stierlin, 1979]





Fig. n°I.2 : Le baptême du Christ, par Lambert Sustris. Source: [www.mba.caen.fr](http://www.mba.caen.fr)



Fig. n°I.3 : L'arche de Noé, Vitrail du XVII<sup>e</sup> siècle, Église Saint-Étienne-du-Mont, Paris  
Source: <http://www.techno-science.net>



Fig. n°I.4 : mosquée du Shah, Ispahan.  
Source: Stierlin. H, 1979

## I.2 Symbolique de l'élément eau :

Toutes les civilisations humaines, tout au long de l'histoire, sont fortement liées et dépendantes de l'eau et des systèmes aquatiques. Et le regard que ces civilisations ont porté sur elle a donné naissance à une riche symbolique qu'on retrouve partout, des croyances religieuses à l'art et à la poésie en passant par la conception des villes, l'architecture, le tracé des routes et voies de communication.

Cette substance ; source de l'imaginaire et des rêves (comme là qualifie de nombreux philosophes) est sans doute origine de toute chose. Au départ la relation des hommes à l'eau a été celle d'un don divin, d'où souvent l'interprétation du symbole de l'eau « source de vie ». L'eau est symbole de vie en ce qu'elle est indispensable à l'homme « *C'est ce qui empreigne toutes ces nourritures et fait son sang, c'est ce qui sépare la mort (sécheresse) de la vie....* » [Bouguerra. M-L, 2006]

Source de vie et bien d'autres adjectifs sont attribués à l'eau ; dans le cadre de notre étude, nous allons aborder brièvement comment l'eau est perçue pour voir comment pourrait-elle influencer notre espace de vie.

### **I.2.1 Chez les philosophes :**

Tales, considère l'eau comme une substance primordial "*materia prima*" d'où la terre et le feu ont émergé.

Platon choisit l'icosaèdre<sup>2</sup> comme symbole de l'eau : «...Attribuons à l'eau la forme la moins mobile....le corps le plus grand...le troisième corps ». <sup>3</sup>

L'eau plus exactement le fleuve désigne pour Héraclite le temps qui s'écoule. La métaphore cherche à rendre compte du mobilisme universel, du passage de temps qui entraîne l'ensemble des phénomènes naturels vers leur disposition.

Chez Hegel l'eau n'est citée qu'à titre d'exemple, elle représente la nature en composition à laquelle il définit la conscience de soi et de l'art.

Pour Gaston Bachelard<sup>4</sup>, les raisons pour lesquelles l'imagination se développe à partir de l'eau, sont ces valeurs symboliques prêtées à l'eau et qui se retrouvent dans certains mythes et ont de ce fait une portée universelle.

Pour Henri Bergson : l'eau est l'Alpha et l'Oméga de la vie, le pont entre « la mortalité et la spiritualité ».

### **I.2.2 L'eau pour l'homme :**

D'autres significatives de l'eau, celles perçues par l'homme dans son quotidien:

- L'eau est *source de vie* ; on associe l'eau souvent à la vie, à la naissance, à la reproduction et au pouvoir.

- L'eau est *fluide*, elle épouse toutes les formes qu'elle rencontre sans jamais les contrarier. Des générations entières ont été marquées par l'idée de la vie s'écoulant comme un fleuve.

- L'eau semble *faible* alors qu'en réalité elle est la *force* ; des 03 éléments terrestres, elle domine toujours, que se soit par sa douceur lorsqu'elle érode les rochers au fil des siècles où bien par ses colères en torrent ou en pluie, elle soumet la terre à son courroux.

---

<sup>2</sup> Icosaèdre : Un des cinq solides de Platon, Il est composé de 20 faces qui sont des triangles équilatéraux. Il a 12 sommets et 30 arêtes et 5 arêtes en chacun des sommets.

<sup>3</sup> Platon Extrait du Timée.

<sup>4</sup> Gaston Bachelard ; philosophe français, auteur du livre « l'eau et les rêves, essai sur l'imagination de la matière »

- L'eau est *apaisante* quand l'homme apprend à l'écouter couler entre les cailloux dans le calme des montagnes et les clapotis des vagues sur le sable.
- L'eau est *visuelle* ; ses couleurs sont variables des bleus profonds aux verts tendre.
- L'eau est *la sagesse* elle n'a point de constations, elle coule sur les reliefs de la terre sans accroche, exprimant ainsi le caractère du sage à épouser les difficultés de la vie pour mieux les dépasser.
- Son cycle : évaporation-pluie- retour à la terre, à la source puis à la rivière à nouveau. Ce processus est riche de nombreux enseignements ne serait-ce que celui de la fin qui engendre son commencement.
- L'eau *réfléchit l'univers*, elle renvoie à cette totalité à laquelle elle appartient.
- L'eau est *fée créatrice* des oasis, elle fait du désert un jardin ravissant.
- L'eau est aussi *énergie*, vigueur et tonus
- S'asperger et se trouver arrosé d'eau est une *marque de respect* et on s'attire de bonnes grâces du destin.
- L'eau est aussi *synchrétique* ; elle a des vertus curatives.
- L'eau est *sacrifiée et célébrée* par des festivités à travers le monde.
- L'eau, vectrice privilégiée des traditions et des croyances. Eau sacrée et eau profane se mêlent au cours des célébrations pour exprimer des vœux de la bonne année ou rendre hommage.

### Synthèse

Dans cette première partie, nous avons vu que l'eau n'est pas juste un élément vital pour tous les êtres vivants ; elle est aussi vue et expérimentée par différentes façons. Elle est universelle non pas seulement par sa présence sur toute la planète, mais aussi pour le rôle qui lui est attribué, ainsi que les rites et cultures dont elle constitue la source dans le monde entier.

Quand elle est immobile (étang, lac), l'eau crée un sentiment de tranquillité, tandis que son mouvement interpelle d'autres types de sensations. A cause de sa transparence et sa réflectivité, l'eau prend sa couleur de son environnement réfléchi sur sa surface, ou des objets sous marins à travers son corps transparent, elle est miroir de ce qui l'entoure. Mais l'eau n'est pas que visuelle, elle est aussi sentie et entendue. Les bruits de l'eau, (gouttes de pluies sur les toits, le glouglou doux de la truite, clapotis des vagues sur le sable, etc.)

ont toutes les caractéristiques d'une musique : variétés de volumes, rythmes, harmonies, gammes...

Pour tout cela et bien d'autres raisons, composer avec l'eau n'est pas une tâche facile, elle nécessite une connaissance et appréciation de ses qualités et un savoir faire.

## **II. L'eau dans la ville :**

*« Depuis la nuit des temps, l'homme a développé les pratiques de l'eau, en tant qu'élément primordial de la nature conditionnant sa survie, en installant ses agglomérations (ville, villages, etc.) près des cours d'eau, des rivières et des nappes phréatiques. Les anciennes civilisations nous renseignent sur les techniques de l'eau transmises et développées d'une civilisation à l'autre : Babylone, le barrage de l'ancien Yémen, les pharaons et le Nil, la Grèce antique, les anciennes civilisations asiatiques, les aqueducs et les bains des romains, l'ensemble des systèmes d'exploitation et de gestion de l'eau assimilés et développés par la civilisation islamique et finalement, les ouvrages complexes développés à l'époque contemporaine. En fait, chaque civilisation a su et pu développer, selon son contexte géographique, climatique et culturel, les processus de gestion et d'exploitation de l'eau. Et l'on peut conclure d'emblée que les systèmes d'eau sont les plus caractéristiques de l'universalité de l'Homme » F. Serrhini dans 'L'eau à Fès, symbole d'une civilisation urbaine'*

Cet extrait, résume l'importance de l'élément naturel « eau » dans la naissance, l'implantation et la croissance des villes. Dans ce qui suit nous allons aborder quelques périodes dans l'histoire des villes en nous intéressant principalement aux pratiques liées à l'élément Eau.

### **II.1 L'eau à Rome :**

Avant la création des aqueducs<sup>5</sup>, les romains puisaient leurs eaux au Tibre, puits et sources. Ils conservent jusqu'à nos jours la vénération traditionnelle à ces dernières ; on croit la santé aux malades comme c'est le cas pour celle d'Apollon et Juturne. La croissance démographique dans la capitale posait un sérieux problème en matière d'approvisionnement, c'est à cette période que Rome voit naître Aqua Appia<sup>6</sup>-premier aqueduc- suivi d'un ensemble d'aqueducs et fontaines. L'utilisation abondante de l'eau est une des caractéristiques marquantes de la civilisation romaine. Un énorme réseau urbain de

---

<sup>5</sup> Ouvrage d'adduction d'eau.

<sup>6</sup> Premier aqueduc romain construit en 312 Av JC.

canalisations<sup>7</sup> cachées sous la pierre, chemine dans toute la ville et alimente des centaines de fontaines qui coulent en permanence, jour et nuit.

Les fontaines s'implantent de plus en plus nombreuses et de plus en plus somptueuse. De nos jours, elles ont perdu leur rôle utilitaire, mais leur beauté constitue un des charmes incontestables de Rome.

Rome disposait aussi de plusieurs centaines de thermes, dont les plus célèbres ceux d'agrippa, Néron, Titus, et de Domitien. Ils avaient deux fonctions : bains hygiéniques et les immersions dans les eaux curatives. Dans les domus<sup>8</sup> et villas des riches, les installations de bains privés vont de la simple salle d'eau à de véritables thermes en miniature.



Fig. n°I.5 : Thermes Romain Italie  
Source: <http://www.oldukphotos.com>



Fig. n°I.6 : Fontaine de Trevi, Rome, Italie  
Source: <http://www.fotocommunity.fr>

## II.2 Chez les Perses (Iran)

Le challenge de garantir des conditions de vie tolérables dans le climat chaud et aride du désert, spécialement le long des voies de passages des caravanes s'était traduit par une attention particulière accordée à l'élément eau : comment le trouver, le stocker et quel était le meilleur moyen pour l'apprécier. Le système de Qanat<sup>9</sup> mis en œuvre, assurait l'amenée d'eau des hauteurs autour de la frange du plateau, par des tunnels jusqu'aux villes et villages (à Téhéran, le système de Qanat continuait à approvisionner la ville jusqu'au début des années 50) [Beazley. E, Harverson. M, 1985]. La création et la survie d'un village dépendait de l'approvisionnement de l'eau et aussi de la manière dont elle était contrôlée et partagée (droit d'irrigation).

---

<sup>7</sup> Les canalisations étaient généralement réalisées avec des feuilles de plomb roulées autour d'un calibre, puis soudées par un raccord de plomb bordé de cordons d'argile.

<sup>8</sup> Maison romaine

<sup>9</sup> (kariz en persan) est un système d'irrigation souterrain permettant de récolter les eaux d'infiltration

Les perses ont employé autant d'imagination et énergie pour rendre l'eau agréable que pour sa gestion et son usage quotidien ; l'eau était aimée et non gaspillée quelque soit son utilisation, pour le plaisir ou pour des raisons pratiques. Par exemple, du temps de « Cyrus le grand » (560 ans AV J.C), l'eau était ingrédient essentiel de la création du paradis terrestre : au cœur du parc, le modèle et la forme du jardin royal étaient définis par des voies d'eau étroites soigneusement décorées, interrompues à intervalles réguliers par de petits plans d'eau de forme carrée. L'eau s'écoulant produisait un bruit enchantant agréable. A Ispahan, par exemple, un merveilleux pont fut construit à deux niveaux, conçu pour le plaisir de l'eau au dessus d'un déversoir qui indigne l'eau quand il est bas. Des pique-niques et des rassemblements s'effectuaient à cet endroit enchanteur.

### **II.3 L'eau à Fès :**

Le choix du site de fondation de la ville de Fès, par Moulay Driss et son compagnon s'est porté sur un site très riche en eau. Fès, dispose d'une nappe phréatique profonde, et d'une autre superficielle, ayant donné lieu notamment, à l'émergence de sources naturelles abondantes.

Les réseaux hydrauliques de la ville se sont développés selon trois types :

- Eaux de rivières : servaient au remplissage des bassins de jardins et riads, à l'irrigation, l'arrosage et le lavage. Ce réseau est alimenté à partir de la rivière "Oued Fès", l'eau est canalisée à travers des voûtes souterraines allant parfois jusqu'à trois mètres d'hauteur. Les eaux de rivières servaient aussi à la motricité des moulins dans les lieux favorisant les chutes d'eau. Pour l'irrigation l'eau était élevée par des norias<sup>10</sup>. Aussi, des aqueducs généralement suspendus sur les parties supérieures des murailles, permettent d'acheminer les eaux vers leur destination pour les usages domestiques ou d'irrigation.

- Eaux de sources : réseau " eau potable", à partir d'une vingtaine de sources qui se trouvent dans les différents quartiers de la Médina, les eaux sont conduites à travers des canalisations en poterie appelés Fekhti, aux fontaines publics, dans les rues, souks et demeures. Pour des lieux de grande importance tel que l'université de "Quaraouiyine" ou le mausolée de Moulay Driss, les fontaines sont alimentées par plus d'une source par mesure de précaution en cas de contamination ou d'arrêt de jaillissement d'une d'entre elles.

---

<sup>10</sup> En arabe ناعورة : désigne une machine hydraulique permettant d'élever l'eau, fonctionnant suivant le principe du chapelet hydraulique.

- Eau rejetée : “réseau d’assainissement”, c’est le réseau de collecte des eaux ménagères et sanitaires. Il est constitué de canalisations souterraines en maçonnerie de formes carrées ou voutées appelées Sloukia.

On ne peut quitter Fès sans parler de ses fontaines qui constituent la face visible du système hydraulique. L’eau est reçue dans un contexte architectural et artistique digne de la valeur que porte l’homme à l’eau. Les mâalams bâtisseurs, donnaient un soin particulier aux lieux d’arrivée d’eau dans les demeures et équipements publics; des fontaines murales toujours bien situées sur un axe visuel en face d’une chambre principale. De belles décorations en zellige entouraient souvent les jaillissements d’eau et qui étaient retenues dans des bassins de forme rectangulaires. Un orifice situé à la partie haute du bassin permettait d’acheminer le trop plein vers les jardins et vergers.

#### II.4 L’empire ottoman :

Pour des raisons rituelles mais aussi culturelles, la présence des fontaines et bains était aussi importante que la construction des mosquées et lieux de culte. Dans la période du roi “Sulaiman”, l’empire ottoman a connu la réparation et modification des aqueducs byzantins et leur raccordement avec les nouveaux monuments et nouvelles cités.

Les fontaines publiques existaient en grand nombre aussi, leur construction était devenue spécialement à Istanbul, le 2<sup>o</sup> élément ornemental de l’espace urbain. Les espaces ouverts étaient concentrés autour des points d’eau et fontaines.



Fig. n° I.7 : grande fontaine, style baroque .Place publique, Istanbul. Source : Maurice. M Cerasi, 1985

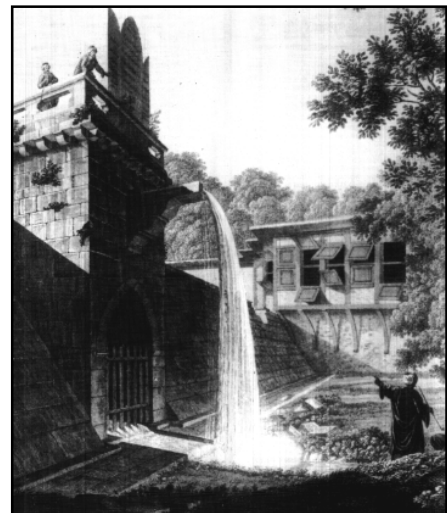


Fig. n° I.8: water, trees and the felling of the place, barrage à Istanbul.Source: Maurice .M Cerasi, 1985

## II.5 Différentes manières d'approcher l'eau dans la ville du 21e siècle :

De nos jours, trouver les moyens pour franchir, aborder, habiter les bords de mers, rivières ou toute autre étendue d'eau est un défi qui stimule l'imagination des hommes et suscite le progrès technique. Il s'agit à présent de composer avec l'eau, explorer les implications fonctionnelles et formelles des plans d'eau dans la proposition architecturale [Prelorenzo. C et al, 1993].

L'eau sous ses différentes formes, rivière, canal, mer ou lac peut être gérée comme une fin, un bord, une limite et éventuellement une cassure, une interruption, un empêchement. En général, l'espace urbain est composé de manière à profiter au maximum des surfaces aquatiques. « *Il faut qu'il puisse la voir, la toucher* » [Prelorenzo. C et al, 1993].

L'eau peut n'être qu'un des éléments constructifs de la ville et non forcément fondatrice. La consultation de plusieurs exemples à travers le monde, nous a permis de relever certaines formes de dialectique eau/ ville ou espace urbain :

- Dans certaines villes, la rive est dégagée, la trame urbaine est arrêtée avant qu'elle touche le bord de l'eau ; un espace ou une aire plutôt large, réservée aux loisirs par exemple, marque cette séparation.

- Parfois la rive est découpée pour faire pénétrer l'eau à l'intérieur de la ville. il s'agit là d'un jeu entre l'élément liquide et l'élément terrestre qui assure une variété paysagère très convoitée. Structure de plan de masse en forme de peignes, dont les dents dessinent des promontoires qui semblent vouloir « *agrafer le plan instable de l'eau* » [Prelorenzo. C, et al, 1993].

- Triple incrustation des plans : végétal, minéral et plan d'eau.

- Assurer la continuité visuelle entre le cœur de l'îlot ou l'espace et le plan d'eau, comme par exemple les constructions sur pilotis, une implantation perpendiculaire à l'eau qui permet d'ouvrir des perspectives sur le plan d'eau et de créer une transparence.

- Marquer la graduation entre bâti et l'eau par une implantation parallèle au canal par exemple. Ou encore assurer la force topographique du terrain par une composition rayonnante.

- La création des cités s'est étendue même au niveau des mers, le palmier (à Dubaï) en est le parfait exemple.

- La relation espace urbain/étendu d'eau est assurée par la création de ponts, passerelles, pontons...



- exprimer morphologiquement la perception de l'eau au travers de repères structurels représentatifs.

- L'eau architecturée participe à l'identification, à la pratique des espaces (fontaine, quais, pont, lac, étang, bassin)

- La reprise de la forme des canaux, rivières... à l'intérieur de la ville.

- Faire du bord de la ville un lieu habité.

- Cette eau est aussi parfois, mise en scène en tant que décor urbain.

- Certaines villes se sont aussi développées en tournant le dos à la présence de l'eau (Bordeaux, Brest)

En présence de surfaces aquatiques, les territoires qui associent terre et eau correspondent à plusieurs types d'univers assez contrastés ; le premier univers est celui du port et ses différentes formes d'accueil et embarcations (image industrielle et technique du site...).

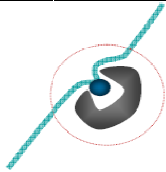
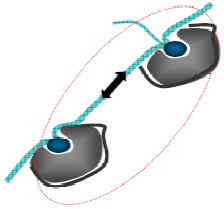
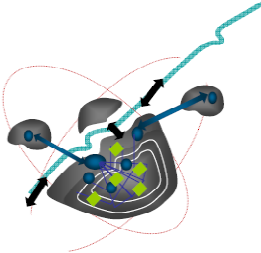
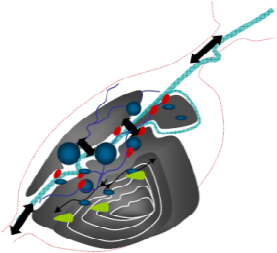
Le deuxième, celui du balnéaire et la création d'un tourisme lié à l'eau par l'aménagement décoratif du rivage, balcons de rotondes pour la jouissance du panorama et des infrastructures nécessaires. Le troisième univers, celui du voyage, transport...

L'eau est aussi une donnée géographique de la nature qui renvoie à l'écologie. « *Elle induit un traitement réversible et précautionneux du support naturel et aussi plus largement, celui d'une culture urbaine soucieuse de ne pas perdre le contact avec la terre, le végétal et l'animal* » [Werquin. A]

A présent la dimension écologique de l'eau se révèle très importante, l'écologie urbaine concerne un champ plus large que la simple présence visuelle de la nature en ville, elle s'intéresse notamment à l'effet de la végétation et l'eau sur la température de l'air et le cycle d'eau.

La croissance urbaine s'accompagne avec une imperméabilisation considérable des sols (chapitre IV). L'eau ne peut plus s'infiltrer, ce qui entraîne l'abaissement des nappes phréatiques. On voit alors naître de nouvelles techniques (voir chapitre II) pour d'une part stocker l'eau pluviale mais également s'en servir pour les loisirs et la régulation microclimatique par rafraîchissement passif et évapotranspiration en présence des arbres. Ainsi l'eau remplit plus qu'un simple rôle écologique, ce qui lui donne plus de chance de se maintenir en ville

Le tableau qui suit est une tentative de synthèse, des différentes formes et vocations prises par l'eau dans la ville à travers l'histoire.

<i>Périodes urbaines de l'eau</i>	
<i>Période néolithique et paléolithique</i>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div> <p><i>Eau domestique et nourricière</i><sup>11</sup> : Territoire compact</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div> <p><i>Eau transport et communication</i><sup>12</sup> : Territoire linéaire</p> </div> </div> <p>*Gestion rationnelle, respectueuse et équilibrée exprimée au travers du mode de vie (spirituel) La source est mélange de sacré et de profane.</p>
<i>Influence Romaine</i>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div> <p><i>Eau domestique associée à l'Eau esthétique</i><sup>13</sup> Territoire aquatique étendu au-delà du cours d'eau en un ensemble homogène et cohérent</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>Eau Transport et communication</i> Territoire aquatique s'ouvre au cours d'eau</p> </div> </div> <p>*Le transport de l'eau par la fabrication de nombreux contenants : aqueducs et ponts *La fontaine est le monument utilitaire du sacré et les thermes, bains et jardins sont lieux de convivialité et de sociabilité *Gestion rationnelle, respectueuse et équilibrée de l'ensemble *Agrémentation du cadre de vie</p>
<i>Influence Moyen âge</i>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div> <p><i>Eau vive esthétique et loisirs</i> (ville haute : habitat) <i>Eau industrielle et matière première</i> (ville basse : activités artisanales et portuaires) Territoire ouvert, unité indissociable qui inclut <i>Eau transport et communication</i> (cours d'eau)</p> </div> </div> <p>*Les infrastructures pour conduire l'eau, la contenir, la franchir et utiliser sa force sont omniprésentes. *Paysage aquatique.</p>

<sup>11</sup> Eau domestique et nourricière : eau vitale, eau hygiène et eau de pluie

<sup>12</sup> Eau transport et communication : réseau eau et échange.

<sup>13</sup> Eau esthétique : eau d'agrément (fontaine, bassins, jets d'eau, étangs, etc.)

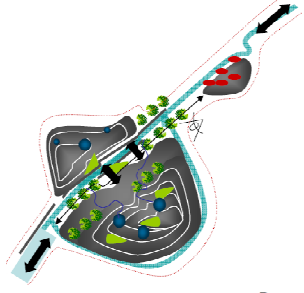
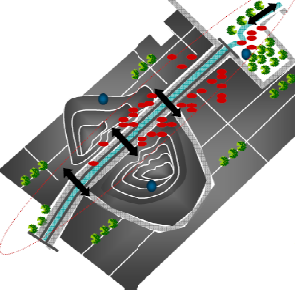
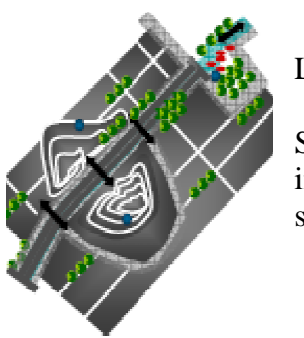

<p><i>Influence Renaissance</i></p>	 <p><i>Eau Esthétique et loisirs</i> : structure et enrichi la qualité du cadre de vie urbain associé à l'<i>Eau transport et communication</i>.</p> <p>Territoire aquatique est en ouverture spatiale et en épanouissement culturel.</p> <p>*Gestion basée sur l'hygiénisme: faire circuler l'eau et l'air dans la ville. *Des ponts sont construits pour dégager les vues sur les cours d'eau dont le front est devenu un espace d'articulation de la ville</p>
<p><i>Influence Industrielle</i></p>	 <p>Eau industrielle et matière première, associée à l'<i>Eau transport</i></p> <p>Territoire de l'eau est concentré sur la vallée et s'étale linéairement le long du cours d'eau</p> <p>*Sacrifié à l'esthétique, à la représentation et au divertissement, puis à l'usage industriel, le cours d'eau est fragilisé (cohérence d'écoulement et capacité de résilience pour écrêter les crues). *Rupture écologique entre l'eau et la ville.</p>
<p><i>Après Révolution Industrielle</i></p>	 <p>L'Eau répond à la seule fonction d'alimentation.</p> <p>Son artificialisation et son utilisation marginale impliquent une perte de son rôle structurant et symbolique.</p> <p>*Altération des territoires aquatiques.</p>
<p><i>A l'ère du développement durable</i></p>	 <p>L'eau est vectrice de valorisation et d'amélioration du cadre de vie, potentiel de liaisons et de développement.</p> <p>Renouement avec les Eaux symboliques.</p> <p>Le territoire aquatique est identitaire et catalyseur de la qualité du cadre de vie.</p>

Tableau I.1 : tableau récapitulatif, formes de dialectique eau/ville. Source : idées, schémas Xanthoulis Sandrine, adaptés par Auteur

## II.6 Ouvrage d'adduction d'eau :

Les premiers moyens de transport de l'eau de la source vers l'intérieur des enceintes des villes remontent à 1900-1800 Av J.C, à Gizeh en Palestine [Lavedan et al. 1966], ils opéraient uniquement grâce à l'effet de pesanteur. A l'ère romaine, les aqueducs ont vu de grands développements, les vestiges se trouvant partout dans le bassin méditerranéen en sont les témoins. Les différentes sociétés musulmanes aussi, se trouvant confrontées au manque et au problème d'approvisionnement d'eau, répondent avec un trésor d'imaginations, les foggaras (dans les régions du Gourara, Adrar) et le Qanât (en Iran) signifient tous un système d'irrigation souterrain. La foggara est une galerie drainante creusée en ligne droite de l'amont en aval, elle capte et amène l'eau de l'eau souterraine vers le terrain à irriguer et ce grâce à une pente appropriée. Le kariz (qanât) est composé de plusieurs dizaine de puits alignés (dont la profondeur diminue progressivement) et qui amènent l'eau souterraine jusqu'à la surface de la terre. L'emplacement du qanât est aussi bien étudié ; terrain ayant une pente naturelle afin de pouvoir amener l'eau à une pression donnée.

Avec le développement industriel, plusieurs innovations technologiques ont vu le jour, comme la possibilité d'ajouter la pression à l'eau. Une fois le transport assuré, le stockage et la mise en valeur de cette eau se sont diversifiées par la suite.

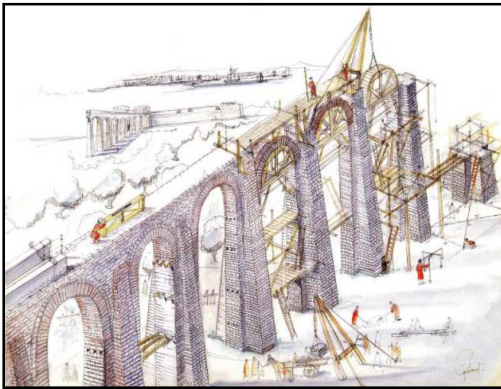


Fig. n°I.9 : Aqueduc en cours de construction  
source :



Fig. n°I.10 : Foggara, Adrar Algérie  
source : <http://www.lnr-dz.com>



A gauche, Fig. n°I.11 : le porteur d'eau  
source : Universalis, 2012



A droite, Fig. n°I.12 : canalisation en bois et plomb  
source : Universalis 2012

De nos jours, on pense les ouvrages d'adduction d'eau comme partie intégrante de l'architecture du lieu. Les châteaux d'eau sont maintenant revêtus de matériaux modernes, ils adoptent des apparences régionalistes marquant ainsi son appartenance à l'espace.



Fig. n° I.13 : Château d'eau, Chavagnes les eaux. La reprise de la forme du moulin à vent, inversement.

Source : Glikou. M, 2005



Fig. n°I.14 : Château d'eau pensé comme un bâtiment par Philippe Madec.

Source : Glikou. M. 2005

### **III. L'évolution de l'utilisation de l'eau dans le jardin :**

L'eau a toujours été un élément essentiel de la vie des jardins, elle leur donne doublement la vie : en tant qu'élément nourricier indispensable des végétaux, mais aussi en tant que composante mobile de l'espace.

Nous allons, ici, retracer chronologiquement l'évolution de l'utilisation de l'eau dans les jardins et par conséquent son évolution à une échelle urbaine et parfois architecturale.

#### **III.1 Mésopotamie et l'Égypte :**

Les premiers développements de l'art des jardins s'observent au sein des civilisations ayant su contrôler la ressource hydrique dans un environnement plus ou moins aride :

En Mésopotamie on voit l'exemple des parcs royaux assyriens irrigués par des canaux et alimentés par des aqueducs.

L'Égypte : l'eau dans des bassins rectangulaires ombragés d'arbres, une image qui pouvait reproduire la fertilité de l'environnement aquatique des berges du Nil.

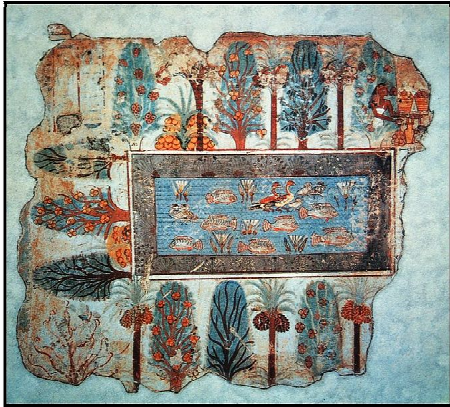


Fig. n°I.15 : Bassin d'eau dans le jardin égyptien. Source : Brunon. H, ND

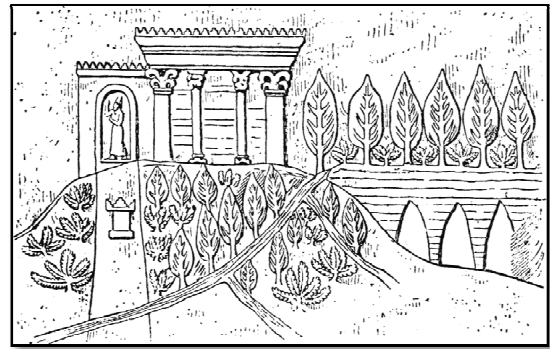


Fig. n°I.16 : jardin de Babylon. Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Hanging\\_Gardens\\_of\\_Babylon.gif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Hanging_Gardens_of_Babylon.gif)

### III.2 Rome antique :

L'empire romain connaît l'épanouissement du jardin qui devient une composante obligée de la demeure urbaine (domus). Associée au goût de luxe, l'omniprésence de l'eau doit rafraichir ; bassins centraux et vasques dans les péristyles, fontaines murales et nymphées ornées de mosaïques pour animer les salles à manger d'extérieur, dont le décor mythologique évoque souvent les divinités du monde naturel, canaux faisant allusion à des fleuves.



Fig. n°I.17 : Casa de los Vetii Pompéi, Italie.  
Source : Brunon. H, ND



Fig. n°I.18 : fontaine et Mosaïque de Neptune et d'Amphitrite à Herculaneum.  
Source : Brunon. H, ND

### III.3 Les jardins islamiques

L'histoire des jardins commence avec celui de l'Eden, symbolisant le sceau de l'harmonie entre Dieu et l'homme avant le premier péché, et continue avec les jardins persans de Mésopotamie et d'Iran.

Dans le monde islamique, le jardin promet un avant-goût du paradis. De ce fait, l'inspiration artistique des plans des jardins provient de la vision musulmane du paradis. Aux musulmans sont promis des jardins avec des fontaines jaillissantes, des sources

coulantes, des arbres fruitiers, ainsi que des lits ornés d'or et de pierres pour se reposer à l'ombre. Cette notion d'un paradis luxuriant est particulièrement importante pour le peuple musulman, manquant d'eau et confronté à des conditions climatiques difficiles. La création des jardins dans le monde musulman a permis le développement graduel d'un mode d'architecture essentiellement islamique et symbolique, qui fut plus tard adopté en Occident. L'eau ici, reflète le ciel et l'architecture dans de simples miroirs- servant de réservoirs- ou s'écoule le long de rigoles à l'instar des dispositifs d'irrigation agraire.



Fig. n°I.19 : les escaliers d'eau –Generalife-  
Source : Stierlin. H, 1979



Fig. n°I.20 : Jardin de Fine, Kâchân, Iran  
Source : Djamiléh Zia



Fig. n°I.21 : Jardin de Châhzâdeh - Kermân, Iran  
Source : Djamiléh Zia



Fig. n°I.22 : Jardin du Taj Mahal - Inde  
Source : Stierlin. H, 1979

### III.4 La renaissance :

Le jardin prend de l'ampleur en cette période, avec l'agrandissement des jardins et l'adoption de tracés géométriques, on voit la parution d'orgueilleux jets d'eau très appréciés par les promeneurs. L'eau devient le fil conducteur des compositions monumentales en pente réalisées dans la région de Rome grâce à une transformation radicale du site.

L'eau jaillissant à la verticale relève d'une esthétique de la « nature artificielle » visant à combler les sens et à exalter les puissances vitales domestiquées par l'homme.



Fig. n°I.23 : fontaine des dragons, villa este-Italie-  
source : <http://www.jardins-de-france.com>



Fig. n°I.24 : Rampes des escaliers, villa este-Italie- Source : <http://www.jardins-de-france.com>

### III.5 L'âge baroque

Les eaux conservaient leurs rôles mais la grande innovation, se sont les miroirs d'eau qui ont fait la gloire de Chantilly et bien sûr de Versailles. C'est à cette période qu'on voit intégrer les jeux optiques dans la structure des jardins. Ils marient l'eau et lumière faisant rayonner cette dernière depuis le jardin lui-même.

### III.6 Au 19<sup>ème</sup> siècle

Les progrès technologiques au cours du XIX<sup>e</sup> et surtout du XX<sup>e</sup> siècle ont permis la facilité de mise en œuvre. Ainsi, grâce au pompage électrique, le jaillissement vertical d'un jet d'eau, autrefois véritable prouesse technique, devient un ornement des plus banals. L'eau est désormais mise en lumière, chorégraphiée par programmation informatique, diffusée en nappes de brouillard par des brumisateurs...

Cependant, les préoccupations actuelles en matière d'écologie – aspiration du « développement durable », dans le contexte du changement climatique – invitent dorénavant à un usage plus parcimonieux de l'eau, y compris pour l'arrosage. On assiste par exemple au développement de « jardins secs », ne nécessitant aucune irrigation grâce à l'emploi de végétaux résistants à la sécheresse (plantes méditerranéennes, graminées, etc.).



## **IV. Exemples caractéristiques de l'utilisation de l'eau en architecture :**

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à un ensemble de projets, qui à travers le monde ont suscité un intérêt particulier à cause de la présence de l'eau. Qu'elle soit symbolique, d'agrément ou ayant une vocation de régulateur microclimatique, l'eau est une composante importante de ces œuvres.

### **IV.1 Architecture musulmane en Espagne, l'Alhambra :**

En Espagne musulmane, l'eau avait beaucoup d'importance. C'est un des signes de propreté, elle est indispensable à leurs rituels religieux (voir en haut du chapitre) et de richesse (fontaines et bassins installés dans les maisons et palais de riches).

L'Alhambra : Le palais nasride est la partie principale de l'Alhambra, il est composé de deux grandes salles. Dans l'une d'elles se trouve la cour des lions qui représente le paradis musulman, les colonnes font penser aux palmiers d'une oasis et au centre la célèbre fontaine aux lions ; une source qui symbolise l'océan recevant la pluie. Cette fontaine est soutenue par douze lions en marbre qui représentent les douze mois de l'année. Ces statues crachent chacune un jet d'eau et alimentent quatre canaux représentant les rivières du paradis (du lait, du miel, du vin et de l'eau).

Dans la 2<sup>e</sup> partie on observe un bassin d'eau qui prend une place très importante, il fait presque toute la largeur et la longueur de la cour de l'Al berça.

On ne peut manquer de revenir au Généralife, le somptueux jardin qui se trouve autour du palais nasride. Un très grand jardin rempli de plantes mais aussi d'eau, on peut y voir un escalier (La Escalera Del Agua) ou les rigoles remplies d'eau jouent le rôle de rambarde. Ces rambardes servent aussi à rafraîchir l'air pour les promeneurs. A chaque plate forme, un petit jet d'eau décore en déversant de l'eau.

À l'Alhambra, la présence des bassins est très importante, on y trouve aussi beaucoup de fontaines. Les musulmans trouvaient qu'elles apportaient une ambiance agréable ainsi qu'une sensation de calme et sérénité dans l'espace.

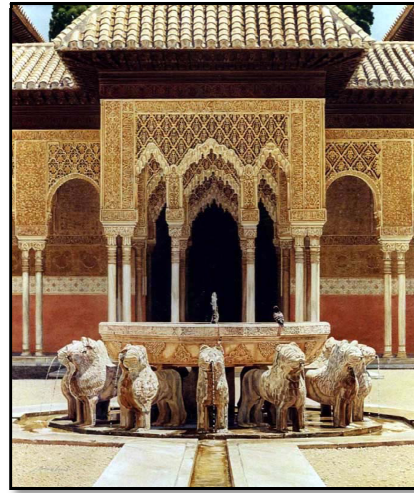


Fig. n°I.25,I.26 : en Haut, ‘l’eau miroir de l’architecture’, bassin des partal. A droite, cour et fontaine des lions ‘‘ image du paradis’’ source : Stierlin. H, 1979

#### IV.2 L'eau dans les jardins de Versailles:

Classé depuis plus de trente ans comme patrimoine mondial de l'humanité, le château de Versailles constitue l'une des plus belles réalisations de l'art français au XVIII<sup>e</sup> siècle. Ses jardins furent développés avec son évolution.

L'eau -plus encore que l'architecture végétale- sous toutes ses formes est l'ornement privilégié des jardins de Versailles. L'eau jaillissante des fontaines, l'eau cascade de certains bosquets et l'eau calme des vastes nappes qui reflètent le ciel et la lumière offrent aux visiteurs du château un spectacle inouï.

Une cinquantaine de fontaines offrent de merveilleux effets d'eau, l'eau en bouillons, en lames, en langues ou en gerbes. Cette mise en scène, en plus du charme qu'elle offre, s'associe d'une manière symbolique, aux différentes sculptures pour raconter une histoire de la mythologie.



Fig. n°I.27 : Feu d'artifices lancés derrière le bassin du char d'Apollon durant les grandes eaux nocturnes source : <http://www.chateauversailles.fr>



Fig. n°I.28 : Bassin du char d'Apollon source : <http://www.chateauversailles.fr>



Fig. n°I.29 : vue du parterre d'eau- source :  
<http://www.chateauversailles.fr>

\*Le parterre d'eau : Ces deux grands bassins rectangulaires reflètent la lumière et éclairent la façade de la galerie des Glaces. Les deux parterres d'Eau apparaissent comme le prolongement de la façade du Château.

### **IV.3 Le temple d'eau (Awaji, Japon):**

Au Japon, le rapport entre la nature et l'homme est particulier, et fort différent de celui qui existe dans les autres cultures. Cette différence explique en grande partie l'esprit qui a déterminé la culture japonaise et qu'on retrouve dans l'architecture.

Dans l'architecture religieuse japonaise, les significations de l'eau ont une base spirituelle et une portée symbolique importante. Depuis les principales réalisations architecturales japonaises des tertres funéraires, de l'architecture religieuse (shintô et bouddhique) et jusqu'à nos jours [kontossis. A, 2007]. Les exemples sont nombreux et très riches, nous en avons choisi un, contemporain et dans lequel l'eau est combinée à l'architecture pour lui donner plus de force et de sens grâce à la richesse de ses significations symboliques.

Le temple bouddhiste Honpuku-Ji, connu sous l'appellation du temple de l'eau, est une des réalisations du célèbre architecte japonais Tadao Ando. Le temple, situé sur l'île de Awaji est construit sous un étang de lotus. Au début le visiteur du temple se trouve en présence d'un long mur en béton avec une seule ouverture, en passant par, un autre mur moins haut cette fois-ci et curviligne dirige le visiteur, jusqu'à l'étang de lotus qui reflète les collines et le bambou environnants. L'accès au temple se fait par des escaliers imprévisibles qui mènent vers un sous-sol, sous l'étang.

L'idée du projet reflète le caractère japonais énigmatique : ce qu'on voit à la surface, modestement exprimé par les deux murs n'est que la peau du véritable cœur caché et qui a une signification plus profonde. L'eau ici en plus de sa dimension symbolique, a permis de renforcer le lien du bâtiment avec son site, en plein forêt de bambou et montagne.



Fig. n°I.30 : Entrée du temple percée au milieu de l'étang source : <http://www.japanlivingarts.com/?p=2119>



Fig. n°I.31 : le temple Honpuku-Ji, source : <http://www.japanlivingarts.com/?p=2119>

#### IV.4 Mémorial du 11 septembre :

A l'emplacement même où se trouvaient les tours jumelles du World Trade Center, l'intitulé « Reflecting Absence » vient commémorer l'évènement du 11/09

Le mémorial, conçu par Michael Arad, architecte américain se compose de deux percements de 10m de profondeur qui délimitent l'emplacement original des tours et le lieu des deux chutes d'eau perpétuelles, même au plus froid de l'hiver. Autour des bassins les noms des disparus sont gravés sur des parapets en bronze. En leurs centres, une ouverture carrée dans laquelle l'eau se perd. Au dessous, invisibles, les atriums du musée offrent lieux de digne recueillement.

Le défi relevé par ce projet était d'exprimer- contrairement à l'habituel- la non-architecture où l'absence de l'architecture, reflétant ainsi le grand vide, l'absence radicale. L'eau tombe en cascade dans chaque bassin avant de disparaître dans un espace vide au centre. *«Je voulais que ce soit très symbolique, là où il y avait la présence, il y a l'absence, la où il y avait du solide, il y a le vide».* Michael Arad

Le choix de l'élément eau en mouvement a pour but aussi de refléter le dynamisme de la ville *«Il ne s'agit donc pas d'un lieu mortifère et pathétique, d'une image noble et solennelle d'un monument paré de toutes les offrandes sacrificatoires... mais d'un miroir de la vie urbaine, lequel nous exhorte à apprécier son éternelle vitalité».* Ce même mouvement, la chute continue de l'eau ; provoque chez certains new yorkais un sentiment de paradoxe avec la mémoire et le courage que l'on veut célébrer.

L'intégration de l'eau par l'architecte était aussi dans le but de créer un cadre sonore, une ambiance par le mouvement de ce même élément, sa vitalité affirmée par la présence de plantations devrait rendre la vie au lieu. Tout comme ce même mouvement rappelle la chute et l'implosion; symbolise un vide sans fond.

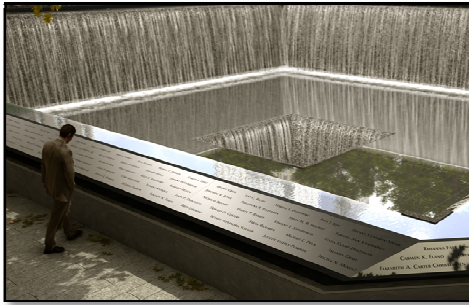


Fig. n°I.32 : Chutes d'eau - source : <http://www.dezeen.com/>



Fig. n°I.33 : deux percements, lieux des deux chutes d'eau perpétuelles - source : <http://www.dezeen.com/>

### *I. Synthèse :*

Cet aperçu ne prétend pas à l'exhaustivité, mais nous a révélé, que la présence des fontaines et de l'eau dans les villes n'est pas récente. Cette présence nous renseigne sur la façon dont la conception des villes a toujours été liée à l'eau et son utilisation ; de l'antiquité en passant par le moyen âge et jusqu'à nos jours.

L'eau dans la ville créé une atmosphère particulière, elle exprime un rapport vivant entre la ville et ses abords. Mais aussi empreigne la ville par son impact durable sur son image (voies d'eau pour marchandises, transport, équipements pour fournir l'eau, etc.). Elle accomplit ainsi des fonctions culturelles, architecturales, économiques et sociales, ce qui lui donne plus de chance de se maintenir en ville.

Cependant, il ne faut pas négliger le fait qu'aucune autre ressource naturelle ne subit d'aussi fortes demandes que l'eau. Il est donc impératif de réfléchir et agir, chacun à son échelle, pour une utilisation rationnelle et un traitement soigné, afin de continuer à tirer profit de ses qualités particulières.

## **Conclusion :**

Parler de la relation entre l'eau et l'architecture c'est avant tout parler de ses rapports avec l'homme. Source de vie, moyen de purification, régénérescence, l'eau porte une dimension symbolique chez les hommes de toutes les civilisations et partout dans le monde. Mais cette eau n'est pas que symbole et relation avec le sacré, c'est aussi un élément de contemplation mis en scène, pour certains, un enjeu politique et économique pour d'autres, et un élément de composition (voir structuration) des villes, espaces urbains et architecturaux.

La relation homme/eau a souvent nourri l'imaginaire des architectes, pour des projets où le liquide et le solide se complètent ou s'opposent pour construire des habitations, monuments, jardins...

Dans ce chapitre nous avons essayé de démontrer, la place de l'eau dans l'espace de vie à travers le temps. Beaucoup de villes, villages à travers le monde sont nés de l'eau et lui doivent leurs expansions. L'eau désirée (celle qui alimente) et l'eau rejetée (celle qui menace) sont deux aspects qui caractérisent les relations que l'homme entretient avec cette source et qui ont largement influencées son développement et son architecture.

Depuis l'antiquité, les impératifs de recueillir et gérer cette précieuse ressource, ont donné naissance à de nombreux ouvrages et dont certains, sont classés patrimoine de l'humanité : aqueducs, moulins, galeries souterraines... Ces ouvrages ont participé à la transformation du paysage urbain. L'eau constitue là encore la source de ces techniques et des développements des sociétés.

Ces progrès techniques ont donné une autre dimension à la relation eau/ architecture *“Flotter, canaliser, enjambrer, ancrer... S'insinuer ou jaillir, dissimuler ou glorifier, suinter ou s'engouffrer... Chanter, murmurer. Douce, froide, sinueuse, sulfureuse... Transparence, effet miroir... le vocable de l'eau s'invite au carrefour de l'architecture, de l'art et du design.”*[Caudrelier M, 2010]

L'époque moderne a connu aussi, de spectaculaires réalisations, où les architectes ont exploité le thème eau sous différentes formes et ont démontré qu'on peut vivre en parfaite symbiose avec la nature. En plus de ceux abordés dans la dernière partie du chapitre ; on pourrait citer encore “ The falling water”, la maison sur la cascade de F.L. Wright construite en 1939, le pavillon allemand de Mies van der Rohe à Barcelone, le musée de Guggenheim à Bilbao par Frank O'Ghery, etc. Ainsi, jeux d'eau et idées d'architectes se multiplient et c'est l'eau qui donne sens à ces idées.

Derrière le jeu d'un étang et la sérénité qu'il peut apporter, l'eau se fait bassin de rétention et source renouvelable. De nos jours, et dans une optique de développement durable, l'architecture s'est trouvée de plus en plus impliquée dans la recherche des méthodes les plus appropriées pour non seulement là mettre en valeur, bénéficier de ses vertus, mais aussi là protéger et là gérer au mieux.

Dans le chapitre qui suit, nous allons aborder l'eau sous un autre angle ; l'eau énergie et élément régulateur du microclimat. Par ce passage, nous voulons rappeler les principales caractéristiques de l'eau, physiques et chimiques ; comprendre ce qui fait que cette eau puisse rafraîchir et comment. Aussi, un ensemble de techniques ancestrales et contemporaines sera présenté.





# **CHAPITRE II:**

## **RAFRAICHISSEMENT PASSIF**



Fig. n°II.1 : Utilisation de l'eau pour rafraîchissement 'brumisateu au niveau d'el Harem el chérif', Arabie saoudite. source : photo prise par pèlerin, 2013

*“ La présence plantée de platanes avec sa fontaine correspond à un modèle d'espace extérieur urbain présentant des aptitudes microclimatiques favorables au confort de la région méditerranéenne. En effet, où l'on se trouve, la voûte formée par le feuillage protège des rayons chauds et éblouissants par ailleurs elle maintient la fraîcheur dégagée par la présence de l'eau.”*

JL. Izard, 1993

## **Introduction :**

Durant la dernière décennie, la recherche du bien être et la demande accrue du confort en période estivale ont conduit à un fort développement de la climatisation dans les bâtiments. Plus de quarante pourcent de l'énergie consommée est utilisée dans les bâtiments, et cette consommation est l'une des causes principales des émissions de gaz à effet de serre. A présent, il est impératif d'appréhender les bons scénarios énergétiques et dès le début de la phase de conception.

Il existe de nombreux systèmes de rafraîchissement passif, certains très anciens, issus de l'habitat vernaculaire, d'autres issus de recherches récentes. Ces systèmes bien étudiés peuvent contribuer à l'amélioration des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence la nécessité d'utiliser ce type de systèmes écologiques et économes en énergie. Dans un premier temps, nous allons aborder le rafraîchissement passif, son importance, ses principes et ses actions par la suite un tour d'horizon permet de présenter les différents types de systèmes de rafraîchissement passif où l'eau -utilisée à elle seule ou couplée- contribue à l'amélioration des conditions climatiques, à l'échelle de la ville et aussi architecturale.

## **I. Pourquoi rafraîchir passivement :**

Plusieurs architectures se sont développées en harmonie avec le climat et la nature. L'absence de l'électricité et des systèmes modernes a induit la mise en place de stratégies pour vivre malgré les aléas du climat. Dans les pays chauds, où des températures bien élevées sont observées, la chaleur dans les bâtiments est plus ou moins maîtrisée sans nécessité d'un système indépendant. L'habitat vernaculaire est généralement un bon exemple d'adaptation de la construction de bâtiments au climat, un confort relatif est obtenu, un peu moins stable que celui procuré par des systèmes de climatisation mais plus en accord avec les conditions extérieures.

Les climatiseurs permettent également d'apporter des conditions de confort, mais ils créent des conditions thermiques dans les bâtiments standardisées et uniformisées ; ce sont des systèmes mécaniques dont le fonctionnement est prévu indépendamment de la conception globale du projet et consomment un taux important d'énergie.

En plus de consommer de l'énergie, les climatiseurs peuvent entraîner des problèmes pour la santé des occupants et pour l'environnement ; les fluides frigorigènes sont en effet de puissants gaz à effet de serre s'ils sont libérés dans l'atmosphère.

Il devient donc nécessaire de s'adapter au besoin de développement durable en limitant la dépendance énergétique ; il s'agit de réduire l'impact environnemental d'un bâtiment et donc ses consommations énergétiques.

Un système de rafraîchissement passif est généralement couplé à un système de chauffage passif ; une conception globale consistant à trouver un compromis entre stratégie d'hiver et stratégie d'été est à mettre en place.

## **II. Comment rafraîchir et le faire de manière passive ?**

Avant de présenter quelques systèmes permettant de rafraîchir un bâtiment de manière passive et en présence de l'eau, il est nécessaire de rappeler les principes physiques et actions qui le permettent.

### **II.1 Les principes physiques**

Il est important de revenir aux principes physiques qui régissent les transferts de chaleur afin de savoir comment les éviter pour privilégier un rafraîchissement du bâtiment.

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est en réalité un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique.

L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid afin de parvenir à un équilibre. Il y a transfert thermique entre les deux corps.

Dans cette recherche d'équilibre thermique, le corps chaud cède de l'énergie au corps froid ; il y a donc échange de chaleur et non de fraîcheur. Le rafraîchissement passif est donc basé sur une limitation des échanges thermiques entre l'air chaud extérieur qui vise à réchauffer l'air intérieur plus frais pendant la journée.

Il peut également se produire des transferts thermiques vers un système dont la température reste constante, par exemple dans le cas d'un changement d'état physique. Un besoin d'énergie pour réaliser un changement d'état peut alors rafraîchir l'air ambiant.

Les transferts d'énergie et de masse sont à la base des processus climatiques et microclimatiques. L'atmosphère est une machine thermique dont l'équilibre énergétique dépend des bilans relatifs aux transferts radiatifs, convectifs et par conduction. Le bilan hydrique met en jeu les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur, ce qui induit des phénomènes diffusifs. [Vinet. J, 2000]

### **II.1.1 Les échanges par conduction :**

Dans les solides et les fluides au repos, les transferts de chaleur s'effectuent par conduction. Ce phénomène correspond à la propagation de proche en proche des énergies moléculaires internes dans les milieux sans mouvement [Vinet. J, 2000]. Les transferts de chaleur dans les sols sont gouvernés par quatre propriétés thermo-physiques : la conductivité thermique ( $\lambda$ ), la masse volumique ( $\rho$ ), la capacité calorifique ( $C_p$ ) et la diffusivité thermique ( $a$ ). On distingue la conduction en régime permanent, pour laquelle la température ne varie pas en fonction du temps et la conduction en régime transitoire dans laquelle l'inertie intervient.

a) Conduction de la chaleur à travers un solide :

Suivant la loi de Fourier, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. Le coefficient de proportionnalité est appelé conductivité thermique ( $\lambda$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ). Ainsi, on exprime le flux par la relation suivante :

$$\theta_{cond} = \lambda \cdot \overrightarrow{GradT} \quad Eq (II.1)$$

De plus, pour un solide, si nous considérons que la conductivité thermique est indépendante de la température, l'équation de l'énergie se réduit à :

$$\Delta T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Eq (II.2)}$$

Le laplacien de la température s'écrit en coordonnées cartésiennes :

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{Eq (II.3)}$$

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

b) Conduction en régime périodique :

Lorsque la sollicitation thermique appliquée au sol est de type périodique, la variation de la température, à une profondeur donnée, est une fonction périodique du temps assimilée à une sinusoïde. L'amplitude des températures s'atténue rapidement et on constate un certain déphasage de l'onde thermique en fonction de la profondeur. Il est possible d'écrire l'évolution de la température dans le sol sous la forme d'une sinusoïde amortie [Guyot 1996, cité par Vinet. J, 2000] :

$$T(z) = T_m + A_s \cdot \exp(-z/z_d) \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_m) - (z/z_d)] \quad \text{Eq( II.4 )}$$

Cette solution de l'équation de Fourier satisfait aux conditions limites suivantes :

Pour  $z = 0$ ,  $T = T_s(t)$

Pour  $z \rightarrow \infty$ ,  $T \rightarrow T_m$

Avec :

$T_s$  : température de surface ;

$T_m$  : température moyenne de la surface ;

$A_s$  : amplitude ;

$t_m$  : instant de la journée où  $T_s = T_m$  ;

$\omega$  : pulsation ( $\omega = 2/86400$  à l'échelle journalière, si le temps est en seconde) ;

$z_d$  : profondeur d'amortissement

$$z_d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad \text{Eq (II.5)}$$

L'évolution de l'amplitude en fonction de la profondeur est exponentielle et s'écrit :

$$A(z) = A_s [1 - \exp(-z/z_d)] \quad \text{Eq (II.6)}$$

Ainsi, à la profondeur  $z = z_d$ , l'amplitude thermique est pratiquement divisée par trois, à  $z = 3$

$z_d$ , elle est divisée par 20 et à  $z = 5 z_d$ , elle est inférieure à 1 % de la valeur initiale. Elle est alors considérée complètement amortie. Cela explique pourquoi il est possible de prendre

comme référence la température mesurée à une profondeur inférieure à un mètre quel que soit le type de sol. A la profondeur  $z = \pi z_d$ , l'onde thermique est en opposition de phase avec l'onde thermique à la surface (la température y est minimale lorsque la température à la surface est maximale et réciproquement). A l'échelle journalière, l'opposition de phase apparaît à une profondeur relativement faible à savoir moins de 50 cm [Vinet. J, 2000].

Le régime de température de chaque sol est profondément modifié par la croissance de la végétation car la surface est de plus en plus à l'ombre lorsque la canopée augmente. La présence d'ombre réduit la température maximale et augmente la température minimale à chaque profondeur et il existe une légère diminution de la température moyenne [Monteith et al. 1991, cité par Vinet, 2000].

### II.1.2 Les échanges convectifs

Un phénomène de convection naturelle apparaît lorsque sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à une différence de température, un courant d'air se met en place. Lorsque l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe, on emploie le terme de convection forcée. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. Différentes corrélations sont proposées dans la littérature pour estimer la valeur de ces coefficients d'échanges [Vinet. J, 2000].

- Les coefficients d'échange convectif :

Des corrélations permettent d'exprimer le coefficient d'échange convectif ( $h_c$ ). Elles sont obtenues à partir d'études en convection naturelle ou forcée sur des plaques planes horizontales ou verticales [Vinet. J, 2000]. Il est possible d'exprimer ce coefficient à partir d'un écart de température entre la surface et l'air et de paramètres que l'on note a, n et b :

$$h_c = a (T_s - T_a)^n + b \tag{Eq (II.7)}$$

Dans le tableau ci dessous (Tableau 1), les valeurs de ces paramètres sont définies par différents auteurs [Inard 1988]. Des différences relativement importantes apparaissent dans les valeurs obtenues.

Auteurs	Surfaces verticales			Surfaces horizontales					
				Flux ascendant			Flux descendant		
	a	n	b	a	n	b	a	n	b
Briss	1.88	0.32	0	2.42	0.31	0	0	0	0.6
Byvok	0	0	4	0	0	5	0	0	2.5
Heat	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7
Gaignou	1.85	0.25	0	-	-	-	-	-	-
Mitalas	1.02	0.33	0	-	-	-	-	-	-
Ferries	1.6	0.33	0	2.1	0.33	0	1	0.33	0
ASHRA	1.24	0.33	0	1.31	0.33	0	1.52	0.33	0

Tab. n°II.1 : paramètres a, n et b en convection naturelle source : Inard, 1988 cité par Vinet, 2000

En convection forcée, le coefficient d'échange peut s'exprimer en fonction de la vitesse du vent et des paramètres a, n et b (Tableau 2) :

$$hc = a + b U^n.$$

$$Eq (II.8)$$

Auteurs	Conditions	a	b	n
Nusselt et Jurges	U < 5 m/s	5.8	4.1	1
	U > 5 m/s	0	7.3	0.78
Ferries		2.5	3.5	1
Sturrock	Paroi au vent	11.4	5.7	1
	Paroi sous le vent	0	5.7	1
Kimamura	Paroi au vent			
	U < 2 m/s	0	8	0.605
	U > 2 m/s	0	12.23	1
	Paroi sous le vent	0.3	0.05	1
Laret	U < 1 m/s	0	2	1
	U > 1 m/s	2	4	1
Ito	Paroi au vent			
	U < 2 m/s	11.7	0.3	1
	2 < U < 8 m/s	6.7	2.8	1
	U > 8 m/s	15	1.8	1
	Paroi sous le vent	9	0.7	1
Croiset	-	3.1	4.1	0.605

Tab. n°II.2 : paramètres a, n et b en convection forcée source : Pingolet, 1994 cité par Vinet, 2000

### II.1.3 Les échanges radiatifs

Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie du système terre-atmosphère. Il est possible de décomposer le bilan radiatif des surfaces en deux parties, dont l'une correspond à la bande solaire (rayonnement de courte longueur d'onde comprenant le visible et le proche infrarouge, bande comprise entre 0.15 et 3.0 µm [Oke 1987, cité par Vinet. J, 2000]) et l'autre aux échanges infrarouges (rayonnement de grande longueur d'onde, bande comprise entre 5 et 100 µm).

L'énergie reçue du soleil par la terre évolue au cours de l'année, à cause de la variation de leur distance et de l'inclinaison. Cette variation saisonnière est faible et on appelle constante solaire la valeur moyenne du rayonnement incident hors atmosphère (environ 1370 W/m<sup>2</sup>).

En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est absorbée, une autre partie est diffusée et enfin le reste est réfléchi. Par conséquent au niveau du sol on ne considère que le rayonnement direct atténué provenant du soleil et la partie diffuse provenant de la voûte céleste.

Au sol le bilan radiatif net (RN) pour une surface horizontale peut s'écrire ;

$$RN = (1-\alpha_{sol}) (S \downarrow \sin h + DH) + L \downarrow - L \uparrow$$

$$Eq (II.9)$$

Avec :

$\alpha_{sol}$  : albédo solaire ;



$S \downarrow$  : Irradiation solaire directe (surface perpendiculaire aux rayons solaires)

$h$  : hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon ;

$DH$  : Irradiation solaire diffuse reçue par une surface horizontale.

$L \downarrow$  : rayonnement de l'atmosphère vers le sol ;

$L \uparrow$  : rayonnement du sol vers la voûte céleste.

#### II.1.4 Le bilan hydrique et la diffusion de la vapeur

Le comportement hydrique d'un sol est caractérisé par des transferts en eau qui se produisent partiellement en phase liquide et partiellement en phase gazeuse. Il est possible de considérer qu'ils sont globalement proportionnels à un gradient de potentiel décroissant et inversement proportionnels aux résistances qu'ils rencontrent [Musy et al. 1991]

Le potentiel hydrique ( $\psi$ ) traduit l'effet des différentes forces de liaison (osmotique, capillaire, d'imbibition...) existant entre les molécules d'eau et les constituants du sol ou de la plante. Il peut être défini comme le travail à fournir à une unité de masse d'eau, située en un point du système, pour la faire passer de l'état d'eau liée à un état de référence, correspondant à celui de l'eau libre à la même température et à un niveau de référence (au niveau du sol, par exemple). Dans les végétaux, le potentiel hydrique peut être considéré comme la somme algébrique des trois composantes : le potentiel de pression, le potentiel osmotique et le potentiel de gravité (faible voire négligeable).

Le potentiel hydrique peut être exprimé en fonction de l'humidité relative de l'air en équilibre avec l'eau liée à la même température [Guyot 1996] :

$$\Psi = \frac{RT}{V_{w0}} \ln\left(\frac{e}{e_s}\right) \quad \text{Eq (II.10)}$$

Avec :

$R$  : constante des gaz parfaits ;

$T$  : température de l'air (K) ;

$e$  : tension de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau liée ;

$V_{w0}$  : volume molaire de l'eau liquide, ( $V_{w0} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )

Le flux vertical d'eau dans le sol est composé de liquide ( $J_l$ ) et de vapeur ( $J_v$ ). Le flux d'eau liquide est relié au gradient vertical du potentiel en eau par la loi de Darcy [Oke 1987],  $K_f$  étant la conductivité hydraulique :

$$J_l = -K_f \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad \text{Eq (II.11)}$$

L'effet de l'évapotranspiration est de créer un gradient potentiel qui devient plus important que le gradient opposé dû à la gravitation et encourage un mouvement ascendant de l'eau

d'un potentiel faible à un potentiel élevé. Le flux de vapeur suit une équation reliant le flux au gradient,  $K_{va}$  étant la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau et  $\rho_v$  la densité de vapeur d'eau :

$$J_v = -K_{va} f \frac{\partial P_v}{\partial z} \quad Eq (II.12)$$

### II.1.5 Bilan énergétique total

Au niveau d'une surface il est possible de déterminer un bilan énergétique à partir des composantes que nous avons présentées ci-dessus. Nous pouvons écrire que le bilan énergétique de la surface est la somme des transferts par convection et advection ( $\phi_{conv}$ ) par conduction ( $\phi_{cond}$ ) et par évaporation ( $\phi_{evap}$ ). Ces transferts doivent équilibrer apports et pertes par rayonnement net ( $R_n$ ), d'où l'expression suivante :

$$R_n = \phi_{conv} + \phi_{cond} + \phi_{evap} \quad Eq (II.13)$$

Ce type de bilan peut être résolu grâce aux techniques de modélisation numérique pour des environnements urbains complexes [Vinet. J, 2000]. Plus de détails seront apportés dans le chapitre IV

## II.2 Les actions de rafraîchissement :

Nous avons donc présenté les différents principes physiques permettant un transfert de chaleur. Lorsque des corps sont à des températures différentes, l'équilibre se fait toujours en faveur du corps le plus froid. C'est en effet le corps chaud qui transmet de l'énergie au corps froid pour atteindre un équilibre. Il n'existe donc pas réellement de principes physiques de rafraîchissement. Il s'agit en réalité d'éviter les transferts de chaleur puisque les transferts de fraîcheur n'existent pas au sens physique du terme.

### II.2.1 Minimiser les apports de chaleur

Tout d'abord, il est nécessaire de limiter les apports de chaleur, aussi bien les apports de chaleur internes qu'externes. Dans les bâtiments performants, les apports de chaleur sont difficiles à évacuer ; il est donc encore plus important de les limiter.

Les apports internes proviennent en premier lieu des individus. Leur métabolisme est en effet une source d'apports de chaleur. Il est variable en fonction de l'activité de l'occupant. Les apports internes proviennent également des équipements électriques. La majeure partie de l'électricité consommée est rejetée sous forme de chaleur, mis à part par exemple l'énergie lumineuse d'une lampe. Il semble donc nécessaire d'adapter nos comportements vis-à-vis des équipements électriques et de privilégier des classes "A" afin de limiter les consommations. Malgré les efforts qui peuvent être réalisés, il sera difficile de réduire significativement ces apports de chaleur.

Il s'agit alors de réduire les apports externes. Ces apports sont les apports solaires directs ou diffus qui pénètrent dans le bâtiment par les vitrages et les parois. Les apports solaires directs doivent être notamment limités au niveau des ouvertures. Les rayons du soleil qui tapent sur le vitrage correspondent en fait à l'effet de serre. Afin de limiter cet apport direct, on peut d'une part agir sur le type de vitrage qui aura une transmission des rayons lumineux plus ou moins importante. D'autre part, des protections solaires doivent être mises en place afin d'éviter tout simplement cet effet de serre, même si des apports diffus seront tout de même possibles. Au niveau des parois, un travail d'isolation peut également être réalisé pour limiter les apports par conduction à travers la paroi. Il faut également veiller à ne pas faire pénétrer l'air chaud de l'extérieur ; un travail sur les stratégies de ventilation est en effet à réaliser. Une bonne étanchéité à l'air est également importante. Ces apports sont donc des apports par rayonnement, combinés ensuite à de la convection à l'intérieur du bâtiment. Il faut donc bloquer ce rayonnement.

### **II.2.2 Evacuer le chaud**

Des solutions pour évacuer la chaleur sont alors à mettre en place. Une stratégie de ventilation semble assez adéquate pour répondre à ce besoin puisqu'elle permettrait d'évacuer l'air chaud. Il est alors nécessaire de ne pas apporter de l'air chaud pour le remplacer, mais plutôt d'apporter du frais. Il faut alors apporter de l'air plus frais et favoriser les échanges par convection. L'air plus frais va se réchauffer au contact de l'air intérieur plus chaud. Le mouvement ainsi induit permettra l'évacuation de cet air tiède jusqu'à obtenir une température satisfaisante.

### **II.2.3 Apporter du frais**

L'apport de fraîcheur est également un des principes de base du rafraîchissement passif. Cela permet de refroidir directement la pièce. Au sens physique du terme, il ne s'agit pas d'un apport de fraîcheur mais d'une prise de chaleur. Comme lors des changements d'état, de l'énergie est nécessaire et elle est donc prise sous forme de chaleur dans l'air ambiant. Par ailleurs, nous verrons que l'air peut être rafraîchi en lien avec l'humidité de la pièce. L'évapotranspiration des plantes est également une source de fraîcheur. La masse thermique permet également d'apporter du frais en déphasant et amortissant la chaleur extérieure.

Après avoir vu les différents principes physiques et actions qui régissent les transferts de chaleur et permettent d'assurer un rafraîchissement, nous pouvons définir quatre principes de rafraîchissement :

- Minimiser les apports de chaleur, à la fois internes et externes, en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois.
  - Apporter de la masse thermique, afin d’amortir la chaleur extérieure pénétrant dans le bâtiment.
  - Ventiler, avec de l’air frais, en favorisant les échanges par convection.
  - Humidifier, afin d’apporter de la fraîcheur par évaporation ou évapotranspiration en présence de plantes.

Le tableau qui suit regroupe un ensemble de systèmes mis en œuvre pour minimiser les apports de chaleur, ventiler l’air ou encore humidifier dans un cadre de rafraîchissement passif. Cette synthèse permet de montrer que certains de ces systèmes réalisent plusieurs actions.

Techniques	Minimiser les apports de chaleur	Apporter de la masse thermique	Ventiler	humidifier
Protections solaires	X			
Diminution des apports internes	X			
Isolation	X			
Vitrages	X			
Façades double peau	X		X	
Inertie		X		
MCP		X		
Ventilation			X	
Puits canadien	X		X	
Eau		X		X
végétation	X	X		X
Terre crue		X		X

Tab. n°II.3 : Principes de rafraîchissement associés aux différents systèmes Source :Duperron, O, adapté par auteur, 2012.

L’eau, peut contribuer donc au rafraîchissement en humidifiant l’air par la vaporisation et a des propriétés intéressantes en ce qui concerne sa masse volumique et sa capacité thermique qui contribuent à la réduction de la température de l’air.

**Synthèse:**

Le rafraîchissement actif, malgré le confort instantané qu’il peut procurer, reste source de nuisances et problèmes sur la santé des occupants et l’environnement. Ainsi qu’une consommation importante d’énergies. Le recours aux dispositifs naturels et solutions

passives se présente être la meilleure action à entreprendre afin de limiter cette dépendance, et réduire l'impact des bâtiments et leur consommations sur l'environnement. En passant en revue les éléments nécessaires à la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur et de masse (échange radiatif, convectif, par conduction, hydriques et bilan énergétique total), nous avons vu que le rafraichissement est basé principalement sur une limitation des échanges thermiques entre l'air chaud (extérieur) et l'air frais (intérieur). Pour se faire des actions sont à entreprendre :

- Minimiser les apports de chaleur, en agissant sur les vitrages par exemple ; les protections solaire, une bonne isolation et étanchéité, etc.
- Evacuer le chaud, par l'adoption de stratégies de ventilation afin d'apporter l'air frais et favoriser les échanges par convection.
- Refroidir, par l'évaporation et l'évapotranspiration ce qui entraine un changement d'état par contact de l'air avec l'humidité de la pièce.

L'eau, employée dans l'espace urbain et architecturale contribue à cette amélioration. Dans ce qui suit nous allons essayer de comprendre comment cela est possible.

### **III. Caractéristiques de l'eau:**

Dans un premier temps, on a jugé important d'aborder l'eau comme substance chimique, prendre connaissance de ses caractéristiques, pour arriver à expliquer les mécanismes qui régissent son rôle d'élément micro-régulateur climatique.

#### **III.1 Définition:**

L'eau (lat. aqua) : liquide transparent insipide inodore. L'eau est un corps composé résultant de la combinaison de deux volumes d'Hydrogène et un volume d'Oxygène de formule  $H_2O$ . À l'état de pureté elle est incolore et sans saveur, elle bout à la température de  $100^{\circ}C$ , sous pression de 1 atmosphère et se solidifie à  $0^{\circ}C$ . C'est un très bon solvant. Elle existe dans l'atmosphère à l'état de vapeur,  $1cm^3$  d'eau à  $4^{\circ}C$  pèse 1g. [Dictionnaire Larousse]

#### **III.2 Sources de l'eau :**

La planète terre est pourvue d'une hydrosphère qui recouvre plus des deux tiers de sa surface, les réserves d'eau représentent  $1\,400 \times 10^6$  Gt dont 97 % sont localisées dans les océans. Les glaciers constituent les plus grandes réserves d'eau douce du monde ( $33 \times 10^6$  Gt), quatre fois plus importantes que l'eau liquide : eaux souterraines ( $8 \times 10^6$  Gt), lacs ( $0,1 \times 10^6$  Gt), eau des sols ( $0,07 \times 10^6$  Gt) À l'état de vapeur, l'eau

atmosphérique ne représente que 13 000 Gt. La ressource en eau renouvelable de la planète est principalement fournie par les précipitations annuelles sur les continents, qui sont estimées à 119 000 km<sup>3</sup>/an. Cela correspond en moyenne à une « lame d'eau » de pluie de l'ordre de 720 mm/an. Le devenir moyen de cette ressource est alors le suivant [Encyclopédie Universalis, 2012] :

- 74 000 km<sup>3</sup>/an repartent vers l'atmosphère, par évaporation directe et surtout par transpiration de la végétation. Cette quantité d'eau alimente à la fois l'agriculture pluviale (5 000 km<sup>3</sup>/an actuellement) et le fonctionnement des écosystèmes. Ce n'est donc en rien une « perte ».
- 2 500 km<sup>3</sup>/an sont constitués de glaces de mer (icebergs), rejetés par les calottes glacières polaires, qui fondent en mer et participent au fonctionnement de la circulation générale océanique.
- 42 500 km<sup>3</sup>/an constituent l'écoulement total sur les continents ; on y distingue 32 500 km<sup>3</sup>/an qui rejoignent les rivières par ruissellement direct lorsqu'il pleut (une fraction peut être récupérée par des barrages et utilisée par l'homme ; ce flux sert aussi aux écosystèmes aquatiques lacustres, fluviaux et côtiers) et 10 000 km<sup>3</sup>/an qui s'infiltrent dans les sols et s'écoulent dans les nappes souterraines (alimentant les rivières lorsqu'il ne pleut pas (7 800 km<sup>3</sup>) ou rejoignant directement la mer (2 200 km<sup>3</sup>).

Il faut noter que l'eau des précipitations sur les continents provient globalement pour 62% de l'évaporation sur ces mêmes continents, et pour 38% seulement de l'évaporation sur les océans. Localement bien sûr, ces pourcentages peuvent varier. Le temps moyen de résidence de l'eau dans chacun des « réservoirs » du cycle de l'eau est de 8 jours dans l'atmosphère, 16 jours dans les rivières, 17 ans dans les lacs, 1 400 ans dans les eaux souterraines, 2 500 ans dans les océans et 10 000 ans dans les glaces.

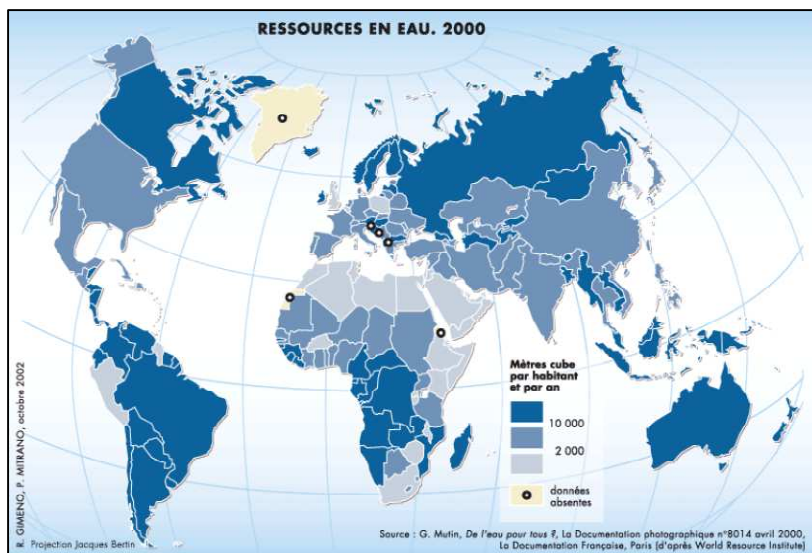


Fig. n°II.2: Ressources en Eau -  
Source. Mutin, G, 2000

La répartition de cette ressource sur la Terre est très inégale. Pour des raisons climatiques, tout d'abord : les zones arctiques, tempérées et tropicales humides se partagent 98 % des eaux qui circulent sur l'ensemble des terres émergées, tandis que les zones arides et semi-arides ne disposent que des 2% restants. Mais les écarts dans les modes et les niveaux de développement socio-économique jouent aussi un rôle déterminant dans les disparités des ressources en eau réellement disponibles. Ainsi, au Sud (au sens géopolitique du terme), plus de 1,5 milliard d'individus sont privés d'eau potable. Quant aux pays industrialisés, ils connaissent une crise latente, notamment en raison des pollutions qui mettent en danger cet élément longtemps considéré comme indéfiniment renouvelable. Les ressources naturelles en eau, potentiellement utilisables, varient suivant les régions de 200 litres à 2 millions de litres par jour et par habitant. [Encyclopédie Universalis, 2012]

### **III.3 Eau, énergie renouvelable :**

Le renouvellement de l'eau bien que régit par un régime climatique spécifique est plutôt assuré. Cependant est-ce que cette même eau peut être considérée comme une énergie renouvelable ?

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

L'énergie hydraulique tire son origine dans les phénomènes météorologiques et donc du Soleil. Ces phénomènes prélèvent de l'eau principalement dans les océans et en libèrent une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements.

De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie peut être alors captée et transformée, lors des mouvements de l'eau qui retourne vers les océans. L'énergie hydraulique peut être directement utilisée sous forme d'énergie mécanique, l'eau d'un ruisseau faisant tourner la roue d'un moulin à eau (fig. n°II.3).

L'énergie hydraulique peut également être convertie en énergie hydroélectrique pour la production d'électricité, que cela soit via une centrale hydroélectrique (fig. n°II.4) ou marémotrice (fig. n°II.5)

L'énergie hydroélectrique est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins...). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. L'énergie hydroélectrique est une énergie

renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone. L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créée par les marées, causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil et récupérées en mer par des turbines marémotrices.

En conclusion, la force de l'eau est utilisée pour faire tourner les turbines de différentes sortes de centrales :

- les centrales hydrauliques, grâce aux rivières et aux chutes d'eau,
- les hydroliennes (des éoliennes sous-marines) grâce aux courants marins,
- les usines marémotrices grâce au mouvement des marées.

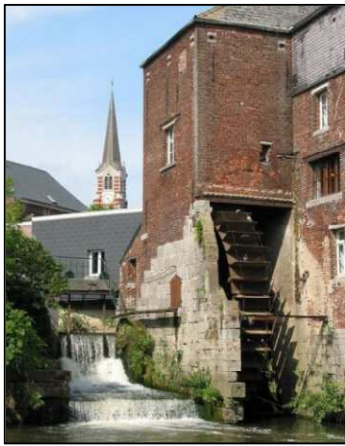


Fig. n°II.3 : Moulin à eau – source : Peeters. V



Fig. n°II.5 : Moulin à marée. Source : Peeters. V

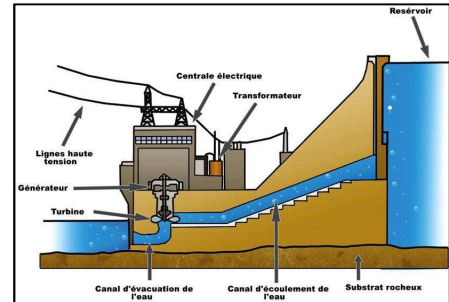


Fig. n°II.4 : centrale hydroélectrique. Source : Peeters. V

### III.4 Le cycle de l'eau :

L'eau existe sur la planète sous trois états : liquide solide et gazeux. Le cycle consiste en un échange d'eau entre les différentes enveloppes de la terre : l'Hydrosphère<sup>1</sup>, l'atmosphère<sup>2</sup> et la lithosphère<sup>3</sup>. Ces enveloppes contiennent de l'eau en quantités variables, l'eau de l'hydrosphère chauffée par le rayonnement solaire s'évapore. Elle rejoint l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Les nuages sont ainsi formés de minuscules gouttes d'eau. Cette même eau, lors des pluies retombe sur les océans et continents. La circulation de l'eau dans la lithosphère emprunte trois voies :

- Le ruissellement, en suivant les reliefs de la roche-mère ;
- L'infiltration, à travers les fissures naturelles des sols et des roches ;

<sup>1</sup> Partie du système terrestre constituée d'eau

<sup>2</sup> Partie du système terrestre constituée de gaz

<sup>3</sup> Partie rigide la sphère terrestre, croûte terrestre



- La percolation, en migrant lentement à travers les sols

Les êtres vivants et particulièrement les végétations ont aussi une influence sur le cycle, leurs racines pompent l'eau du sol et en relâchent une partie dans l'atmosphère on parle alors d'évapotranspiration.

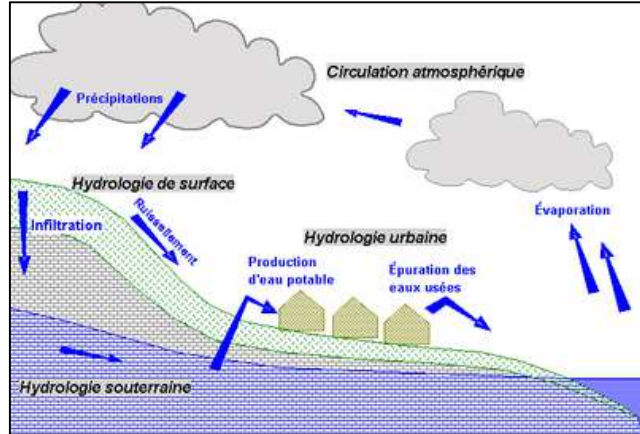


Fig. n°II.6 : Le cycle de l'eau Source <http://www.techno-science.net>

### III.4.1 L'évaporation :

L'évaporation est le passage progressif de l'état liquide d'une substance à son état gazeux. Les molécules de l'eau s'attirent plus ou moins fort selon leur énergie cinétique (vitesse). Cette dernière est d'autant plus grande lorsque la température des molécules est élevée. La force d'attraction rend difficile leur détachement, seules les plus énergétiques arrivent à briser la force d'attraction et s'échappent de la surface du fluide en emportant leur chaleur. L'énergie cinétique de la masse d'eau est ainsi diminuée et l'air environnant refroidi.

De la chaleur (énergie) peut être ajoutée à l'eau par un apport externe : par exemple, quand l'eau est chauffée par le Soleil ou par l'atmosphère en contact avec la surface de l'eau.

Les molécules d'eau qui se retrouvent dans l'atmosphère pour former la vapeur d'eau conservent l'énergie qu'elles ont utilisée pour s'échapper de la masse d'eau. Cette énergie sera libérée dans l'environnement lorsque la vapeur retournera à l'état liquide. C'est la chaleur latente de vaporisation.

Les molécules d'eau présentes dans l'air sont continuellement en mouvement et certaines viennent parfois frapper la surface de l'eau pour retourner à l'état liquide. On parle d'évaporation quand le nombre de molécules qui quittent la surface de l'eau est supérieur au nombre de molécules qui réintègrent la surface de l'eau.

Les facteurs conditionnels de l'évaporation sont assez nombreux, nous en citerons les plus influents :

- Les températures de l'air et de l'eau : La température étant étroitement liée au taux de radiation, lui-même directement corrélé à l'évaporation, il s'ensuit qu'une

certaine relation existe entre l'évaporation et la température de la surface évaporante. Le taux d'évaporation est, en particulier, une fonction croissante de la température de l'eau. Comme la température de l'eau varie dans le même sens que la température de l'air, il est plus facile de mesurer cette dernière. On utilise ainsi dans les formules de calcul de l'évaporation la température de l'air plutôt que celle de l'eau.

- L'humidité de l'air : L'humidité relative est donc le rapport entre la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Si l'air arrive à la saturation, le processus d'évaporation va stopper.

- Le rayonnement solaire.

- Le vent : le vent joue un rôle essentiel sur les processus d'évaporation car c'est lui qui permet par le mélange de l'air ambiant de remplacer au voisinage de la surface évaporante, l'air saturé par de l'air plus sec. Les turbulences permettent entre autre, l'ascension de l'air humide tandis que l'air sec descend et se charge d'humidité.

- La pression atmosphérique : Plus la pression totale au-dessus d'un liquide est élevée, plus grande est sa tension de vapeur ; mais cet effet reste négligeable pour des pressions totales inférieures à 106 Pa (ou 10 bars). Par contre, certains auteurs considèrent que le taux d'évaporation augmente lorsque la pression atmosphérique diminue.

Aussi, certains facteurs physiques du milieu interviennent dans le processus d'évaporation :

- Profondeur : La profondeur de la surface d'eau libre joue un rôle essentiel sur la capacité de cette dernière à emmagasiner de l'énergie. D'une manière générale, la différence essentielle entre une surface d'eau libre peu profonde et une surface d'eau libre profonde réside dans la sensibilité de la première aux variations climatiques saisonnières. Il s'ensuit qu'une surface d'eau libre peu profonde sera sensible aux variations météorologiques selon la saison, tandis qu'une surface d'eau libre profonde, de par son inertie thermique, présentera une réponse évaporative nettement différente. Cependant, les volumes totaux évaporés peuvent être sensiblement les mêmes dans les deux cas.

- Étendue : L'étendue de la surface d'eau libre joue un rôle important sur les quantités évaporées puisque l'évaporation, à vitesse du vent égale, est proportionnelle à la surface évaporante ainsi qu'à l'humidité relative.

- Salinité : Une augmentation de la teneur en sel de 1% environ diminue l'évaporation de 1% suite à la diminution de pression de vapeur dans l'eau salée.

### **III.4.2 La saturation et la pression d'eau :**

La pression atmosphérique de l'air est la somme des pressions de tous les gaz qui composent l'atmosphère. Le gaz qu'est la vapeur d'eau exerce donc une partie de la pression atmosphérique totale.

Au fur et à mesure que l'eau s'évapore, on détecte une faible augmentation de la pression de l'air au-dessus de la surface de l'eau. Cette augmentation de la pression est due au mouvement des molécules d'eau qui sont ajoutées à l'air par l'évaporation. Cette fraction de la pression due à la vapeur d'eau est appelée 'pression de vapeur d'eau'.

À un certain moment, il y a tellement de molécules d'eau dans l'air qui se trouve au-dessus de la surface d'eau que le nombre de molécules qui retournent à l'état liquide devient égal au nombre de molécules qui s'évaporent. On dit alors que l'air est saturé : la pression de la vapeur d'eau a atteint son maximum et n'augmente plus. Lorsque l'air est saturé, on ne peut plus y ajouter de vapeur d'eau.

Toutefois, si on chauffe l'eau encore plus, les molécules deviendront plus énergétiques et une plus grande quantité d'eau pourra s'évaporer avant que l'air ne soit saturé. Cela veut dire que, à des températures plus élevées, il doit y avoir plus de vapeur d'eau dans l'air pour que la saturation soit atteinte.

On sait que, lorsqu'on fait bouillir de l'eau dans une casserole, l'eau passe rapidement de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau). L'eau bout rarement dans la nature et il y a pourtant énormément d'eau qui passe de l'état liquide à l'état gazeux par évaporation.

### **III.4.3 L'évapotranspiration :**

L'évapotranspiration est l'effet combiné de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau sous forme liquide sur une surface ou de celle-ci dans l'air, transformée en vapeur d'eau. La transpiration est le mouvement de l'eau passant des plantes dans l'air. Pour une culture, l'évapotranspiration est l'eau perdue dans l'air à partir à la fois de la surface du sol et de celle de la culture.

Le niveau d'évapotranspiration varie selon divers facteurs. Ces derniers se divisent en caractéristiques météorologiques et en caractéristiques de la plante ou de la surface du sol. Parmi les caractéristiques météorologiques il faut noter la température de l'air, l'intensité lumineuse, le vent et le degré d'humidité. Les caractéristiques de la surface comprennent les caractéristiques du sol, des espèces, le couvert des cultures et leur stade de croissance.

Il faut de l'énergie pour que l'eau passe de l'état de liquide à celui de vapeur et la plus grande partie de cette énergie vient directement du soleil. Le rayonnement solaire direct et

la température ambiante de l'air fournissent l'énergie nécessaire à l'évapotranspiration. Il faut environ 600 calories d'énergie thermique pour convertir un gramme d'eau liquide en vapeur d'eau. La quantité d'énergie reçue du soleil compte pour 80 % des variations dans l'évapotranspiration.

Les facteurs qui touchent le rayonnement solaire direct affectent aussi le niveau d'évapotranspiration. La couverture nuageuse influe sur l'évapotranspiration en limitant la quantité de rayonnement solaire atteignant les cultures ou les sols. Cependant, même par une journée sans nuages il y a encore des fluctuations quotidiennes de l'évapotranspiration. La latitude et la saison influent aussi sur le rayonnement solaire direct et l'évapotranspiration. Le vent est le deuxième facteur le plus important. Les vents affectent l'évapotranspiration car ils peuvent transporter l'énergie thermique dans une zone et en retirent l'humidité vaporisée. Un vent de 8 kilomètres à l'heure (5 m/h) peut augmenter l'évapotranspiration de 20 % dans l'air calme. Un vent de 24 kilomètres à l'heure (15 m/h) peut augmenter l'évapotranspiration de 50 % dans l'air calme [selon Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964, tel que cité par le Geological Survey américain (USGS)].

L'évaporation continue d'augmenter à une vitesse toujours plus grande à mesure que la température se réchauffe, aussi longtemps qu'il y a de l'eau qui peut s'évaporer. Les plantes limitent leur transpiration à mesure que la température monte. La plus grande partie de l'eau que les plantes soutirent est perdue par la transpiration. La capacité de la plante à mieux retenir l'eau dépend des caractéristiques de ses racines et de ses feuilles. Les plantes perdent de l'eau par de petites ouvertures ou pores sur les surfaces de leurs feuilles, appelées stomates. À des températures élevées les plantes tentent de retenir le plus d'eau possible. Elles tentent de conserver leur eau en refermant les stomates pour diminuer la transpiration.

Les différences dans l'anatomie des feuilles, les caractéristiques des stomates, les propriétés aérodynamiques et les caractéristiques de réflectivité peuvent affecter le taux d'évapotranspiration d'une culture. Les caractéristiques de réflectivité de la surface du sol peuvent aussi influencer sur le taux d'évapotranspiration. Par exemple, les champs de luzerne ne reflètent qu'environ 25 % de l'énergie solaire. Le reste de cette énergie solaire est absorbée et contribue à l'évapotranspiration.

L'évaporation et la transpiration se produisent simultanément et il n'est pas facile de distinguer les deux procédés. Il est difficile de mesurer directement l'évapotranspiration car elle varie suivant l'endroit exact et à quel moment elle est mesurée. Elle est souvent

calculée à partir des données météorologiques, mais on peut aussi en faire une estimation sur de plus longues périodes en calculant le bilan hydrique du sol. La méthode Penman-Monteith reste la plus largement employée pour calculer l'évapotranspiration.

### III.5 Les propriétés physiques et chimiques de l'eau:

#### III.5.1 Propriétés physiques :

L'état solide de l'eau est la glace ; l'état gazeux est la vapeur (d'eau), qui est totalement invisible. L'état de l'eau comme nous le voyons dans le graphique qui suit dépend des conditions de pression  $P$  et de température  $T$ .

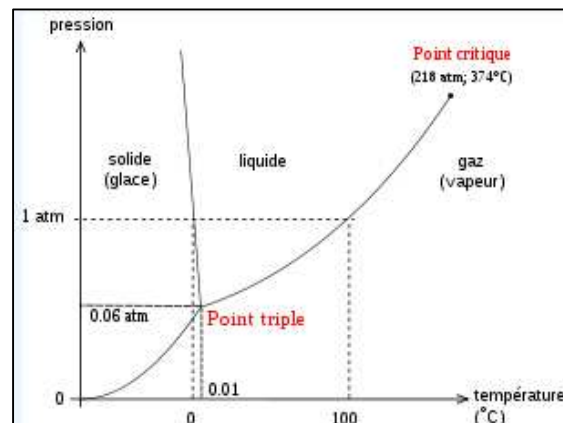


Fig. n°II.7 : Diagramme de phase de l'eau, l'état de l'eau pure en fonction de la température et la pression. Source <http://www.techno-science.net>

Dans ce qui suit, nous présentons quelques caractéristiques physiques de l'élément eau :

- La masse volumique de l'eau est en conditions normales égale à  $1000\text{kg/m}^3$ .
- La densité est de 1 en état liquide et 0.913 en état solide.
- la chaleur massique de l'eau liquide est de  $4180\text{ J/Kg. K}$ .
- La vitesse du son dans l'eau est de  $1\,500\text{ m/s}$  dans les conditions normales de température et de pression.
- Conductivité thermique :  $0.667\text{w/m.k}$
- la masse moléculaire est de  $18\text{g/mol}$ .
- Sa température de fusion est de  $0^\circ\text{C}$  alors que celle de la vaporisation est de  $100^\circ\text{C}$ .

#### III.5.2 Indice de réfraction de l'eau :

L'indice de réfraction d'un milieu transparent est une mesure de sa capacité de changer la direction de propagation d'un rayon de lumière qui y entre. Cet indice dépend de l'état physique de l'eau (solide, liquide ou gazeux) mais aussi de sa salinité.

### III.5.3 Propriétés chimiques :

#### III.5.3.1 Nature dipolaire de l'eau :

La molécule d'eau forme un angle de  $104,45^\circ$  au niveau de l'atome d'oxygène entre les deux atomes d'hydrogène. Puisque l'oxygène a une électronégativité plus forte que l'hydrogène, le côté de la molécule d'eau où se trouve l'atome d'oxygène est chargé négativement, par comparaison avec le côté hydrogène. Une molécule avec une telle différence de charge est appelée un dipôle (molécule polaire). Cette différence de charge, fait que les molécules d'eau s'attirent les unes les autres, le côté positif de l'une attirant le côté négatif d'une autre. Un tel lien électrique entre deux molécules s'appelle un pont hydrogène ou liaison hydrogène. Cette polarisation permet aussi à la molécule d'eau de dissoudre les corps ioniques, en particulier les sels, et de les maintenir dans cet état en entourant chaque ion d'une coque de molécules d'eau, c'est la solvation.

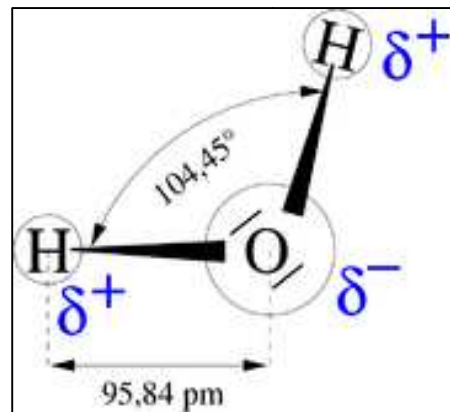


Fig. n°II.8 : Géométrie de la molécule d'eau  
Source <http://www.techno-science.net>

#### III.5.3.2 L'eau comme solvant :

Grâce à sa polarité, l'eau est un excellent solvant. Quand un composé ionique ou polaire pénètre dans l'eau, il est entouré de molécules d'eau. La relative petite taille de ces molécules d'eau fait que plusieurs d'entre elles entourent la molécule de soluté. Les dipôles négatifs de l'eau attirent les régions positivement chargées du soluté, et vice versa pour les dipôles positifs. L'eau fait un excellent écran aux interactions électriques (la permittivité électrique de l'eau est de 78,5 à  $25^\circ\text{C}$ ), elle dissocie donc facilement les ions.

#### III.5.3.3 Équilibre acido-basique

L'eau se dissocie naturellement en ion hydronium  $\text{H}_3\text{O}^+$  et ion hydroxyde  $\text{OH}^-$  :

$$2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \quad \text{Eq(II.14)}$$

Par perte d'un proton  $\text{H}^+$ , elle devient  $\text{OH}^-$ . Par gain d'un proton  $\text{H}^+$ , elle devient l'ion hydronium  $\text{H}_3\text{O}^+$ . On dit donc que c'est une espèce amphotère. Du fait de l'équilibre, à une

température donnée, le produit des concentrations de ces ions, ou " produit de dissociation " est constant. À 25°C, il vaut :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]\cdot[\text{OH}^-] = 10^{-14} \quad \text{Eq(II.15)} \text{ (pas d'unité car constante d'équilibre).}$$

La concentration (en mole par litre) étant symbolisée par une mise entre crochets. Les ions hydronium et hydroxyde sont très réactifs, ils peuvent attaquer d'autres matériaux, les dissoudre. On définit l'acidité grâce à la concentration en ion hydronium, par le pH :

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}_3\text{O}^+]. \quad \text{Eq(II.16)}$$

À 25°C, le pH de l'eau pure vaut 7, il est dit neutre. L'ajout de certains produits dits " acides " va déplacer l'équilibre de dissociation de l'eau et abaisser le pH (augmentation du nombre d'ions hydronium) ; à l'inverse, l'ajout de certains produits dits " basiques " va déséquilibrer la réaction dans l'autre sens, favoriser la présence d'ions hydroxyde et augmenter le pH.

#### III.5.3.4 Conductivité

L'eau pure est en réalité un isolant, qui conduit mal l'électricité. Mais puisque l'eau est un si bon solvant, elle contient souvent une bonne quantité de soluté dissous, le plus souvent des sels. Si l'eau contient de telles impuretés, elle peut conduire l'électricité facilement.

## IV. L'eau comme élément régulateur du micro climat :

L'eau est présente dans la ville sous plusieurs formes, et mise en forme par différentes modalités. Hormis sa symbolique, sa mise en scène et son rôle structurant dans la ville - qu'on a déjà abordé dans le chapitre précédent - l'aspect rafraichissant de l'eau est tout autant important. Nous allons ici essayer de comprendre cet aspect et voir en quoi les dispositifs de rafraichissement sont nécessaires dans les milieux secs et arides pour des fins de régulation microclimatique.

### IV.1 Impact d'une grande étendue d'eau :

La présence d'une rivière, d'un fleuve ou d'un océan peut modifier considérablement certaines composantes du climat local. Ainsi, l'existence d'un éventuel microclimat due à la présence de l'eau a été étudiée numériquement [Vinet. J, 2000]. Un potentiel microclimatique favorable est constaté, il est maximal jusqu'à 100 m de la berge de cette rivière, et correspond à un abaissement de la température de l'air de 6 à 7 °C (à une hauteur de 1.75 m) et s'étend de manière atténuée sur plusieurs centaines de mètre [Fernandes et al. 1998, cité par Vinet. J, 2000].

## IV.2 Le cas d'un bassin :

Pour étudier les phénomènes liés à l'évaporation dans le cas d'un bassin d'eau, nous avons jugé utile de partager une expérience citée dans une recherche faite par [Vinet. J, 2000]

Il est considéré un bassin comme système soumis à des sollicitations extérieures (soleil, vent) et cherchant à équilibrer ses actions (changement de température, évaporation).

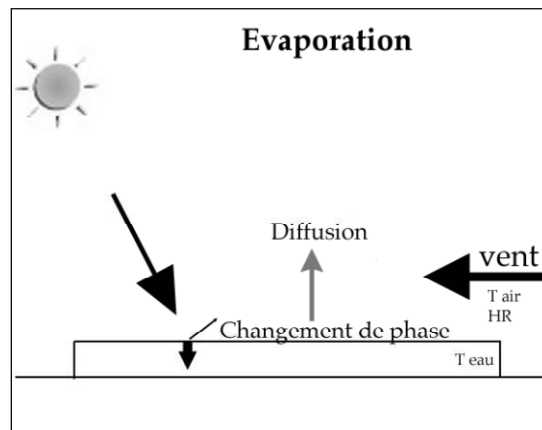


Fig. n°II.9 : Transferts thermiques d'un bassin  
Source Vinet. J, 2000

- Les apports énergétiques solaires, qui en été, atteignent des valeurs élevées et qui arrivent à la surface de l'eau sont faiblement réfléchis (le coefficient de réflexion n'est que de 3% pour les heures de rayonnement maximal) [Alvarez et al, 1989]
- La fraction la plus importante d'énergie qui va être absorbée pourrait augmenter la température de l'eau mais même cette augmentation reste très faible voir même négligeable.

Un transfert de chaleur et de masse se produisent simultanément, le phénomène de diffusion de la vapeur d'eau entre la surface du bassin et l'air peut se produire si la concentration de vapeur d'eau dans l'air est initialement faible. Ainsi, la concentration de la vapeur augmente, de sorte que les deux phénomènes tendent à s'équilibrer. Lorsque cet équilibre est atteint, l'air est saturé de vapeur d'eau. La pression de vapeur d'une eau pure à pression atmosphérique est dite pression de vapeur saturante et est égale à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. Cette diffusion qui entraîne un changement de phase de l'eau liquide en vapeur d'eau à l'interface eau-air est le moteur qui permet de remplacer la vapeur d'eau qui est assimilée par l'air. Ce changement de phase nécessite une importante



quantité d'énergie, c'est la chaleur latente<sup>4</sup> de vaporisation. Il faut 2450 kJ pour évaporer 1 kg d'eau, soit une épaisseur de 1 mm sur une surface de 1 m<sup>2</sup>. Ainsi, lors de l'évaporation d'une zone d'eau une grande partie des apports énergétiques solaires est perdue sous forme de chaleur latente. C'est pourquoi la température de l'eau est alors inférieure à celle de l'air durant la journée.

Ce décalage entre les deux températures est atténué par un transfert que l'on qualifie de chaleur sensible entre l'air chaud et l'eau froide. Il est fonction de l'écart de température et de la vitesse de l'écoulement. Ces deux phénomènes ont un effet opposé. Le résultat est une température d'équilibre. En résumé, dans un premier temps, le processus d'évaporation refroidit l'eau et dans un second temps, l'eau refroidit l'air.

Le fait que la surface de notre bassin soit à une température plus faible que celle d'un sol exposé au même rayonnement solaire nous intéresse car les rayonnements de grande longueur d'onde émis par ces deux éléments sont sensiblement différents. Ainsi, non seulement l'eau renvoie moins de rayonnement solaire (coefficient de réflexion bas), mais en plus elle émet un rayonnement thermique (de grande longueur d'onde) plus faible car elle est plus froide.

Dans la réalité, les situations apparaissent complexes car les phénomènes convectifs, radiatifs et diffusifs ne peuvent être envisagés de manière séparée. Certains cas bien précis nécessitent une appréhension globale des processus physiques qui n'est possible que par la simulation.

### **IV.3 Impact des sources ponctuelles d'eau :**

Dans une étude établie par le [Groupe ABC 1997], les mesures établies au sud de la France ont montrés que les effets des fontaines sont très localisés, les faibles échanges entre cette surface et l'air ne permettent pas un rafraichissement. Les fontaines donc, ne peuvent pas assurer la climatisation naturelle d'un espace urbain. Par contre, à proximité d'un grand jet d'eau, des mesures ponctuelles de l'air environnant ont montré qu'il y avait un effet d'humidification et de refroidissement.

Il est donc important de favoriser des dispositifs qui peuvent jouer réellement sur l'humidification et le rafraichissement de l'air. Lorsque dans un courant d'air on fait évaporer des gouttelettes d'eau la température de cet air diminue et parallèlement il se charge en humidité. Ce procédé est déclinable sous de nombreuses formes, c'est le principe

---

<sup>4</sup> Chaleur latente : C'est la quantité de chaleur nécessaire pour changer l'état d'un corps sans altérer sa température.

des fontaines à jet, des brumisateurs, des climatiseurs, des tours de refroidissement que nous détailler un peu plus loin.

### Synthèse :

Les dispositifs d'eau sont largement présents en ville et sous de multiples formes. Aborder les caractéristiques de l'eau envisage certes de rappeler ces différents points mais le plus important c'est de démontrer la capacité régulatrice de cet élément naturel sur le microclimat.

L'eau, d'une part, avec son cycle joue un rôle complexe dans l'équilibre de l'écosystème. Et d'autre part par ses propriétés physiques, principalement sa chaleur massique et son coefficient de réflexion peut accomplir (selon sa forme) une fonction régulatrice du microclimat.

Il est donc à retenir :

- Les apports énergétiques solaire, qui arrivent à la surface sont faiblement réfléchis (3% pour les heures de rayonnement maximal). La partie absorbée entraîne une légère voire négligeable augmentation de la température de l'eau.
- Pour que l'eau s'évapore, il faut une grande quantité d'énergie (2450 kJ pour 1kg d'eau, soit une épaisseur de 1mm sur une surface de 1m<sup>2</sup>). Une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur latente. C'est pourquoi la température de l'eau est inférieure à celle de l'air durant la journée.
- Afin d'atténuer ce décalage, un transfert qualifié de chaleur sensible entre l'air chaud et l'eau froide s'effectue en fonction de la température et la vitesse d'écoulement. Donc en premier temps l'eau s'évapore et refroidit l'eau et dans un second temps refroidit l'air.
- Aussi, l'eau renvoie moins de rayonnement solaire (coefficient de réflexion bas) et émet un rayonnement thermique plus faible car elle est froide.
- Les dispositifs d'eau ne réagissent pas tous de la même façon, donc il est important d'en choisir en fonction des besoins rafraîchissement et humidification de l'espace.

## **V. Systèmes de rafraîchissement par évaporation :**

De nombreux exemples d'application du système par évaporation existent à travers le monde, à l'échelle urbaine et architecturale ; principalement dans les régions chaudes et arides. L'eau prend différentes formes qui s'intègrent à leurs contextes, permettent dans

certains cas la collecte des eaux pluviales, participe au paysage et aussi contribuent au rafraichissement de l'espace.

### V.1 Les fontaines et jets d'eau :

Les fontaines et bassins sont des éléments prépondérants de l'architecture des pays du nord de l'Afrique, du Moyen-Orient ainsi que dans la Péninsule Ibérique. Leur présence, outre les effets décoratifs et objectif d'animation ; marque la volonté d'humidifier l'air qui circule dans les espaces [Izard, J.L.1993]

Ceux-ci sont utilisés pour rafraîchir l'air en jouant sur l'évaporation de l'eau et la conservation de l'enthalpie. Les jets d'eau sont particulièrement efficaces dans la mesure où l'eau est fragmentée en une multitude de gouttelettes. Ceci augmente la surface d'échange air-eau et favorise donc l'évaporation. Au fur et à mesure, la température de l'eau des réceptacles inférieurs s'abaisse, et l'écart avec la température de l'air ambiant peut atteindre jusqu'à 10 degrés, constituant un stock de froid.

De nos jours, les grandes fontaines et jets d'eau, par les embruns qu'ils sont susceptibles de générer, présentent une efficacité voisine de celle de la brumisation, selon la manière dont le vent achemine ces embruns. Mais il est plus difficile de multiplier les jets d'eau de grande dimension que les gicleurs de brumisation et les quantités d'eau mises en jeu sont sans commune mesure.



Fig. n° II.10 : Bassin avec jets d'eau à Séville  
Source [www.andalusia.org/](http://www.andalusia.org/)



Fig. n° II.11 : fontaine au cœur d'une maison  
Source [http://fr.maieutapedia.org/wiki/Jardin\\_islamique](http://fr.maieutapedia.org/wiki/Jardin_islamique)

### V.2 Les Malqafs:

Ce sont des dispositifs de l'architecture vernaculaire, ils sont employés dans le but d'améliorer la ventilation naturelle des locaux par l'effet combiné : capter l'air à une

hauteur suffisante pour échapper aux poussières et avoir une vitesse d'air suffisante pour générer un flux, puis l'humidifier pour le refroidir par évaporation.

Cela se fait par le moyen d'échangeurs que "Hassan Fathi"<sup>5</sup> appelle "déflecteurs" ; l'eau s'écoule en cascade à travers des mailles métalliques et des bacs remplis de charbon de bois [Izard, J.L, 1993]. Dans certains cas, le système peut être complété par un bassin avec ruissellement (Salsabil).

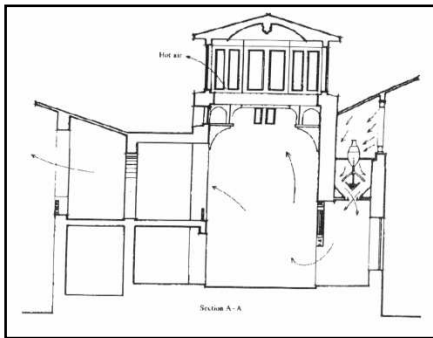


Fig. n°II.12 : exemple de Malqaf avec déflecteurs, source : Fathi. H, 1962

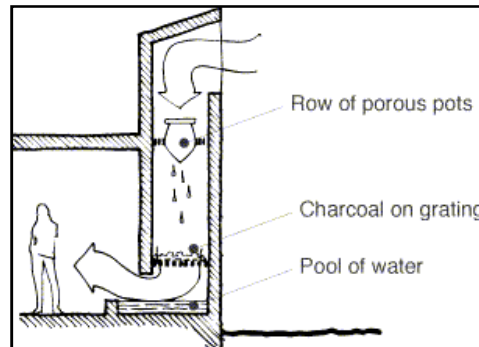


Fig. n°II.13 : exemple de Malqaf, source : Supic.P, ND

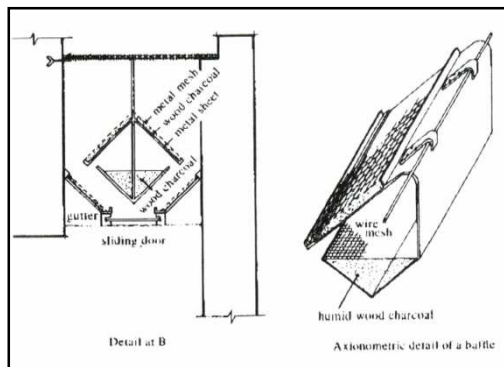
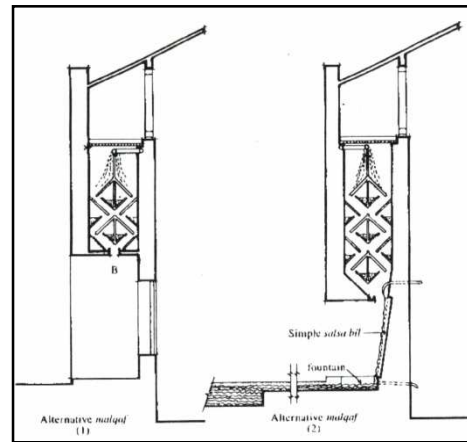


Fig. n°II.14, 15 : variantes et détails de déflecteurs, source : Izard, JL, 1993



### V.3 Tour à vent :

Dans d'autres régions les tours à vent ; "Badgir" se substituent aux malqafs. les anciennes maisons mésopotamiennes possédaient des capteurs d'air, qui conduisaient l'air directement dans les pièces à ventiler. La prise d'air peut se pratiquer dans plusieurs directions, chaque face du conduit est dotée d'orifices posés en diagonale. Ces orifices sont munis de volets qu'il suffit d'ouvrir pour obtenir du courant d'air.

<sup>5</sup> Cités dans son ouvrage sur l'architecture vernaculaire des régions arides chaudes et arides.

Le rafraichissement était parfois accentué en humidifiant l'air au moyen de jarres poreuses placées dans le canal et de bassin d'eau situés en contre bas. Ces charbons de bois humidifiés posés sur une grille filtrent, rafraichissent également l'air qui entre en bas de l'espace.

Il peut être éloigné de la maison et relié avec son sous sol par un tunnel, la présence de la végétation sur le sol au dessus permet à l'eau d'arrosage de s'infiltrer jusqu'au tunnel qui est ainsi refroidi par humidification. Une fontaine ou un bassin d'eau à la sortie du tunnel apportent un refroidissement supplémentaire (ville de Bam) l'air ici est triplement refroidi ; ventilation, évaporation puis de nouveau évaporation au niveau bassin et fontaine (Yazd, Iran).

Dans les tours à vent, humidifier les parois fait que l'air descendant est refroidi à la fois par ventilation et par évaporation, l'eau absorbe suffisamment de chaleur pour se vaporiser. Puis cette vaporisation exige une grande quantité de « Chaleur latente de vaporisation » les tours à vent qui comportent un système de refroidissement par évaporation peuvent refroidir l'air de manière assez efficace et cette humidification rend l'air plus agréable à respirer.

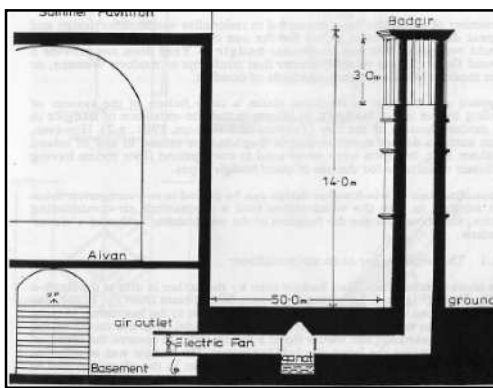


Fig. n° II.16 : Tour à vent avec souterrain pour un refroidissement  
Source : Mahmoudi.M, 2005

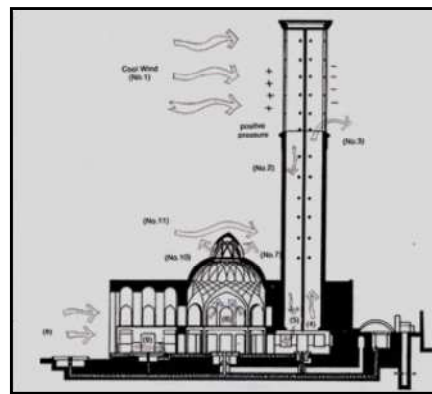


Fig. n° II.17: Capteur d'air, Dawlat Abad yazd, Iran Source : Supic. P, ND

#### V.4 Hyper inertie des glacières:

Une autre remarquable expérience de l'architecture vernaculaire est à citer dans ce contexte. A saint baume (Marseille), la glace fabriquée de manière naturelle pendant les nuits claires d'hiver à de fortes altitudes était stockée dans des tours cylindriques enterrées. On la conservait jusqu'à l'été. La période arrivée la ville était alimentée en moyen de réfrigération mais aussi la chaleur latente de fusion des glaces était mise en jeu. Il faut rappeler là que l'énergie nécessaire pour faire passer l'eau de l'état solide à l'état liquide et

beaucoup plus importante que celle nécessaire pour chauffer la même quantité d'eau à 1°C [Izard, J.L,1993]. En plus, la forme compacte des glaces stockées (cylindrique d'une hauteur du même ordre que son diamètre) est la plus défavorable aux déperditions thermiques.

### V.5 Les minis jets d'eau :

Il est possible aussi d'utiliser des minis jets d'eau directement sur revêtement du sol. Ci après une batterie de mini jets d'eau (hauteur d'environ 1m) vient arroser le revêtement à intervalles réguliers.



Fig. n°II.18 : mini jets d'eau au parc André Citroën Paris7  
Source : <http://www.metropoleparis.com/>

### V.6 Le ruissellement :

Il existe des solutions pour maintenir une surface mouillée : le ruissellement en est une.

Cette solution nécessite une déclivité et des débits relativement importants. Cela peut s'employer sur des surfaces verticales. Le ruissellement peut être animé par des reliefs.

L'eau ruisselante sur un grillage constitue une solution intéressante : l'échange eau/air permet une humidification de l'air et par conséquent un rafraîchissement de sa température.

L'eau a toujours été un excellent moyen pour se rafraîchir, l'environnement bâti peut accélérer son refroidissement grâce à la présence de l'eau. Les concepteurs contemporains ont imaginé l'utilisation de l'eau sous ses diverses formes.



Fig. n°II.19 : Effet de ruissellement. Source : <http://sig.ville.gouv.fr/>

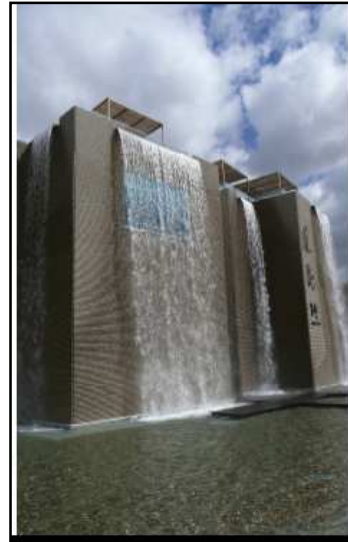
### V.7 Les cascades artificielles:

Il existe d'autres solutions que les jets d'eau pour humidifier l'air par les embruns : une cascade à partir d'un bassin suspendu qui se rompt brutalement sur un sol dur produit aussi des embruns.

Cette solution a été mise en œuvre à Madrid. L'inconvénient de ces cascades est que pour le promeneur, le niveau sonore est en général très élevé, selon la configuration des lieux.



Fig. n°II.20, 21 : Exemple de Cascade artificielle.  
Source : Chanson, H. 1998



### V.8 Les Brumisateurs:

Appelés aussi “générateurs de brouillard artificiel”, ce système fût utilisé à Séville pour l'exposition universelle, il reprend sous forme plus technologique, le principe d'humidification utilisé dans l'architecture vernaculaire.

Le brumisateur fonctionne par atomisation centrifuge, les microgouttelettes projetées dans l'air s'évaporent instantanément en contact de la masse thermique ambiante. Cette vapeur d'eau qui s'échappe du brumisateur consomme beaucoup de chaleur (600 calories pour un g d'eau), l'effet de refroidissement est immédiat.

La réussite de ce système réside dans l'exact équilibre entre un minimum d'efficacité et le risque d'écoulement sous forme liquide. L'eau doit rester sous forme de vapeur, l'autre condition est le maintien des conditions climatiques bien sèches pour permettre à l'évaporation de se produire [Izard, J.L ,1993].

Particulièrement adapté aux espaces extérieurs, le brumisateur convient également aux espaces semi-ouverts ou grands espaces fermés. De nos jours, ils sont utilisés dans les terrasses, parc de loisir, jardins, restaurant ou café, chantier, industrie, école, hôpitaux...etc.



Fig. n°II.22 : Différentes applications de brumisateurs. Source <http://www.brumisud.com/brumisateur-buses.php>

### V.9 Le mur d'eau:

Le mur d'eau est un procédé semblable à celui du mur trombe, à la différence près qu'il est constitué de récipients remplis d'eau à la place de la maçonnerie. Le stockage de la chaleur dans l'eau présente des avantages en particulier la quantité d'énergie absorbée est rapidement transférée à toute la masse d'eau par convection, de sorte que les températures de surfaces sont beaucoup moins élevées.

De plus l'eau est plus facile à utiliser et sa capacité calorifique est plus élevée que celle du béton. Reste à faire un bon choix pour les récipients afin d'éviter la corrosion et inondations. [Lebens. R-M, 1983]



Fig. n°II.23 : Mur d'eau,

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Maisons>

### V.10 Toiture bassin:

Le simple arrosage d'une toiture durant les heures de la journée d'été à Djedda en Arabie saoudite a permis une réduction des charges de climatisation de 40% [expérience menée par Al Aturki et Zahi, citée par Bencheikh. H, 2007]. Un autre système développé par Elzion et Erell, est basé sur l'utilisation d'une serviette de coton humide flottante sur la



surface d'un étang peint en blanc. L'écart de température atteint dans ce cas, est de l'ordre de 6.3° par rapport à les températures mesurées le 7 aout 2002.

Un autre exemple, imaginé et installé par Harold Hay dans une maison construite par lui-même, est constitué de quatre sacs en PVC de 2,7m sur 12,7m et de 0,2 m d'épaisseur. Ils reposent sur des traverses métalliques, qui constituent le toit. Les sacs, remplis d'eau sont couverts de panneaux isolants que l'on déplace grâce à un moteur de 0.75kw pour capter les rayons solaires d'hiver et la fraîcheur d'été. Ce genre de technique est possible avec des constructions à un seul niveau et dans des régions où il ne tombe que peu de neige. [Lebens. R-M, 1983]

Aussi, dans certaines régions de l'Asie, des terrasses équipées de bassins d'eau de quelques centimètres de profondeur (15/30cm) viennent remplacer les toits classiques en tuiles. L'eau fonctionne comme isolant naturel, absorbant la chaleur en été et le froid en hiver.

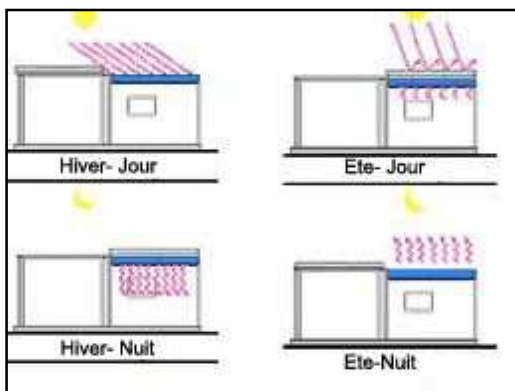


Fig. n°II.24 : principe de fonctionnement d'un toit bassin. Source : <http://www.monplandepiscine.com>

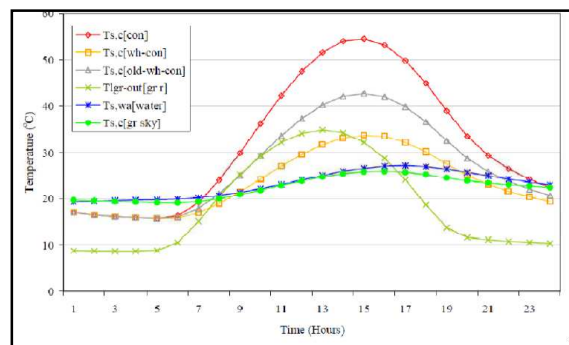


Fig. n°II.25 : graphe illustrant l'efficacité d'un toit d'eau (en bleu) en comparaison avec d'autres types de toitures. Source : cité par Bencheikh. H, 2007

## V.11 Autres systèmes

### V.11.1 L'humidification par atomisation :

L'eau est pulvérisée en fines particules (aérosols) propulsées dans l'air au moyen de buses à air comprimé ou de coupelles rotatives. Ces aérosols en suspension dans l'air passent de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau).

Cette transformation nécessite l'apport d'une énergie thermique prélevée dans l'air ambiant, entraînant ainsi un refroidissement adiabatique. Plus la dimension des aérosols est réduite, meilleur est le rendement du système. Ce principe nécessite le réchauffement de l'air afin de compenser le refroidissement adiabatique.

Il est important d'assurer une maintenance et un contrôle efficaces de l'équipement car la pulvérisation des aérosols provoque la formation de gouttelettes d'eau : dans ce cas, celles-ci risquent de ne pas s'évaporer, entraînant ainsi des zones humides pouvant être le siège de formation de micro-organismes. Par ailleurs, si l'eau n'est pas déminéralisée, des particules minérales se diffusent dans l'air ambiant et se déposent en fine poussière blanche dans les locaux, et à la surface des objets.

### V.11.2 Le système « dessiccant cooling » :

Proposé comme alternative aux climatiseurs traditionnels ce système combine un roue dessiccante avec des systèmes évaporatifs direct et indirect, la chaleur de la régénération de la roue est fournie par une installation solaire ce qui limite la consommation électrique du système. Plusieurs études ont montré qu'il s'agit là d'une solution bien adaptée dans les régions où les apports latents sont limités [Maalouf. M et al, 2006]

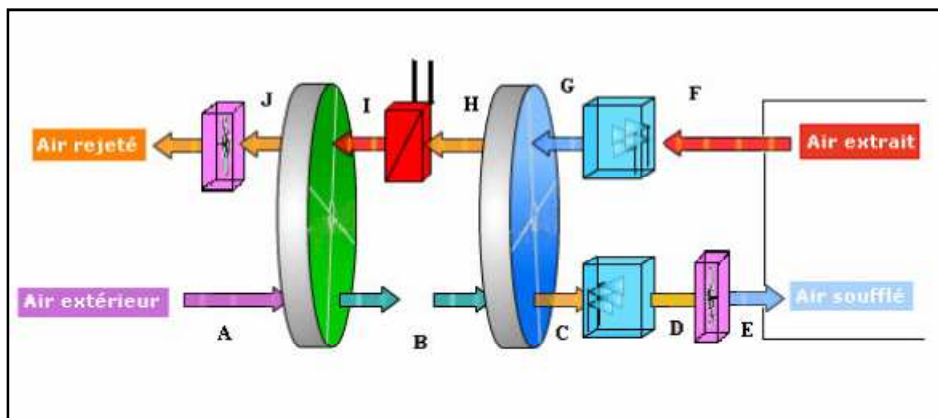


Fig. n°II.26 : schéma d'installation du Dessiccant cooling. Source : Maalouf. C, et al, 2006

### V.11.3 Echangeur adiabatique:

Le refroidissement adiabatique est une méthode de rafraîchissement d'air basée sur l'évaporation de l'eau, un rafraîchissement d'air par évaporation ou de climatisation naturelle. Le principe est simple; l'air chaud et sec qui passe à travers un échangeur humide se refroidit naturellement. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est extraite de l'air qui en conséquence se refroidit. Ce système gagne en efficacité avec l'augmentation de la température extérieure. Au-delà de 30°C, l'air peut se refroidir de plus de 10°C ce qui se traduit par un rendement de rafraîchissement très efficace.

Dans un rafraîchissement d'air par évaporation, une pompe fait circuler de l'eau sur filtres absorbants. Le ventilateur aspire l'air chaud extérieur et le fait passer à travers les filtres humides. L'air est alors refroidi par évaporation.

Pour que ce système fonctionne correctement les bâtiments doivent être bien ventilés afin de pouvoir rapidement évacuer l'humidité engendrée par le système. Les appareils sont le plus souvent installés à l'extérieur. Un système de gaine permet d'amener l'air dans la zone à rafraîchir avant d'être évacué par les ouvertures naturelles ou par des systèmes d'extraction. Ce type de rafraîchissement convient particulièrement aux grands volumes ainsi qu'à tout bâtiment où les apports thermiques sont importants.

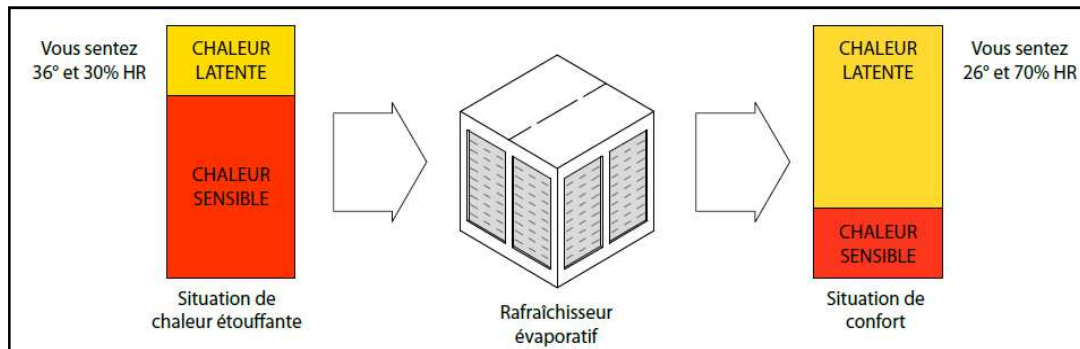


Fig. n°II.27 : principe de l'échangeur adiabatique  
Source : Maalouf. C, et al, 2006

## V.12 Le rafraîchissement par évapotranspiration

### V.12.1 Toiture végétale :

Les toits végétaux permettent de maîtriser le ruissellement et d'utiliser le phénomène naturel de l'évapotranspiration<sup>6</sup>. Ils sont divisés en deux catégories :

- Intensifs : c'est de vrais jardins en toiture ; ils prévoient des espaces pour utilisateurs et par conséquent demandent un entretien intense d'un jardin classique et nécessitent un système d'arrosage. Se sont des structures qui impliquent un dimensionnement adéquat de la structure du bâtiment.

- Extensifs : généralement inaccessibles, ces toitures présentent un ensemble d'avantages :

- Une esthétique plaisante
- Réduction des charges thermiques et refroidissement (elles peuvent réduire de 30 à 20% les besoins de surchauffe et climatisation pour les maisons)
- Réduction de l'îlot de chaleur (l'enveloppe de l'air chaud qui stagne au dessus des villes du fait de présence de matériaux absorbant et l'absence de végétation est

<sup>6</sup> Un arbre est capable d'évaporer 500kg d'eau par an par m<sup>2</sup> de surface externe, cela veut dire 1212MJ/m<sup>2</sup>/an Ce qui équivaut à une puissance de rafraîchissement moyen de 40W/m<sup>2</sup> de surface végétale. Ref : « arquitectura bioclimatica en un entorno sostenible » F. Javier Neila Gonzalez, Pag. 321

connu sous le nom de l'îlot de chaleur urbain. La présence de plantations de végétation, peut réduire cet excédent de température de 5°C [L.B.N.L]<sup>7</sup>

- Réduction de l'émission du CO<sub>2</sub> (processus de la photosynthèse)
- Réduction de la réflexion et de la transmission acoustique (les toits végétaux peuvent réduire de 40 décibels les niveaux sonores intérieurs)
- Réductions des impacts des débordements d'eau de pluie. (un toit végétal peut réduire ce phénomène de 50%).
- Faible entretien avec peu ou aucune irrigation (selon les régions)

Pour la construction d'un toit végétal, les critères suivants sont à prendre en compte :

- Situation du bâtiment,
- Orientation du toit,
- Hauteur du toit par rapport au sol,
- Pente du toit,
- Limitation du poids du bâtiment,
- Plantes préférées,
- Durabilité des composants,
- Entretien nécessaire
- Performance recherchée pour la couche végétale.

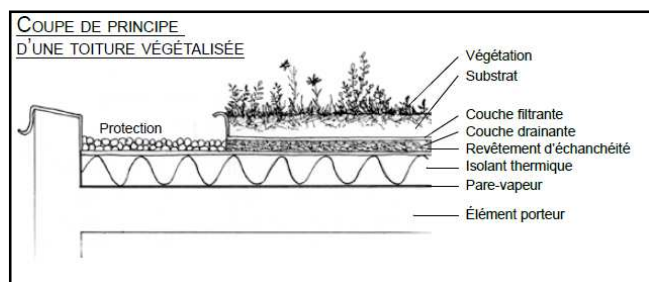


Fig. n°II.28 : Terrasse végétale.  
Source : Degrotte, V, 2006



Fig. n°II.29: Toiture végétale 'School of art, design and media' Singapour. Source: <http://www.adm.ntu.edu.sg>

Fig. n°II.30 : couches composantes d'une toiture végétale. Source : Benhlilou, K, 2008



<sup>7</sup> L.B.N.L : Lawrence Berkeley National Laboratory

### V.12.2 Mur végétal :

A travers l'histoire, le mur végétal appelé aussi jardin vertical ou mur vert, à été longtemps employé pour l'esthétique ou pour contrôler les climats extérieurs et intérieurs. Son concept se rapporte aux plantes grimpantes accroissant sur une paroi verticale. Cette végétation peut être colée directement sur des murs qui doivent être rugueux, ou placée à une certaine distance à l'aide d'une structure.

Pour pouvoir bien planter un mur végétal, favoriser son plein potentiel et sa longue durée de vie, il faut considérer plusieurs facteurs : la surface à couvrir, le mécanisme de préhension des plantes, leur développement et leur taille à l'âge adulte et les variables climatiques. Les jardins verticaux peuvent apporter une amélioration à la température intérieure, réduisent l'îlot de chaleur urbain. Mais aussi, ils peuvent être employés pour leur effet évapotranspiration, de refroidissement par évaporation et d'ombre directe.

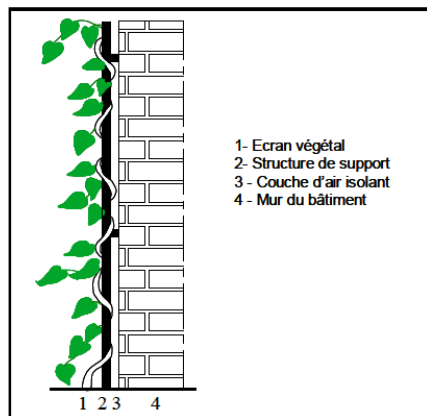


Fig. n°II.31 : coupe sur un mur végétal.  
Source : Benhlilou, K., 2008



Fig. n°II.32 : mur végétal musée du quai, Branly, Paris. Source :  
<http://www.murvegetalpatrickblanc.com>

### V.13 Dispositifs urbains bi-fonctionnels :

Au-delà des surfaces aquatiques qui puissent exister dans la ville, ou à sa limite et qui contribuent à son microclimat, plusieurs techniques ont été développées afin de profiter des vertus de l'eau mais aussi, dans une optique de développement durable assurer sa préservation. Certaines de ces techniques s'intègrent aux bâtiments, à la voirie, aux espaces publics et/ou espaces verts. Elles peuvent être mises en œuvre à l'échelle collective ou individuelle.

#### V.13.1 Le canal hydraulique :

Ouvrage qui permet la traversée des eaux de ruissellement et qui, au lieu d'être busé, est laissé à ciel ouvert. Or ce canal permet d'une part la collecte des eaux de pluies, participe

au paysage, consiste le support des arbres qui puissent s’y trouver et aussi contribue au rafraichissement de la ville.



Fig.n° II.33 : Canal hydraulique, Thérans, Iran  
Source : Degrotte. V, 2006

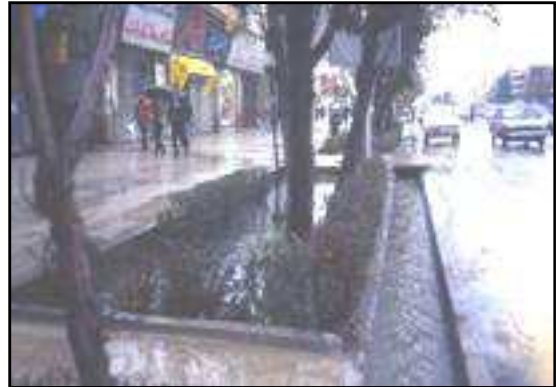


Fig. n°II.34: Canal hydraulique, Shiraz Iran  
Source : Degrotte. V, 2006

### V.13.2 Les bassins de retenue

Ce sont des solutions qui sont mises en œuvre seules ou qui complètent d’autres techniques comme les noues. Il s’agit de bassins qui peuvent être à sec ou en eau, à la parcelle ou collectifs. Ils ont toujours une autre fonction, comme l’aménagement paysager par exemple.



Fig. n°II.35 : Bassin de retenue, France  
Source : Degrotte. V, 2006



Fig. n°II.36 : Bassin de retenue, France  
Source : Degrotte. V, 2006

### V.13.3 Les noues

Ce sont des dépressions larges et peu profondes qui se trouvent le plus souvent le long des voiries. Les eaux y sont acheminées par ruissellement de surface. Cette technique permet de drainer les terrains lorsque la nappe est proche de la surface. Les noues ont trois fonctions possibles : stockage, le drainage et l’infiltration.



Fig. n°II.37 : Noue, France Source : Degrotte. V, 2006

#### V.13.4 Chaussées drainantes :

Une chaussée à structure réservoir est une chaussée dont au moins une couche du corps de chaussée est constituée d'un matériau poreux ou drainant dont le taux de vides communicants (porosité utile) est supérieur à 15 %, l'épaisseur de cette couche étant supérieure à 10 cm.

L'adoption de ce genre de chaussée permet la réalimentation des nappes phréatiques dans le cas d'une évacuation par infiltration dans le sol (pour éviter que la nappe ne soit contaminée au contact d'un quelconque polluant susceptible de migrer dans l'environnement, en particulier au-dessous de la structure, il est nécessaire de disposer d'une épaisseur de sol non saturé de l'ordre de 1 m) ;



Fig. n° II.38 : chaussée drainante.  
Source : <http://www.hqe.guidenr.fr>



Fig. n°II.39: tranchées drainantes. Source : <http://www.hqe.guidenr.fr>

## **Conclusion :**

Dans le chapitre précédent, nous avons pu constater que l'eau est omniprésente dans la ville et l'espace de vie, pour de nombreuses raisons, et après avoir rappelé les dimensions symboliques, qualités esthétiques et sensorielles mises en œuvre, nous avons cherché dans le présent chapitre à exploiter d'autres dimensions, notamment, son influence sur la régulation du climat.

Le recours aux ressources naturelles et dispositifs passifs, s'avère être la réponse la plus adaptée aux besoins du développement durable et aux inquiétudes actuelles. Parmi ces dispositifs nous nous sommes intéressés aux techniques de rafraichissement par évaporation de l'eau.

Dans les anciennes civilisations, l'utilisation des fontaines et bassins était pour embellir l'environnement, créer des effets spéciaux et aider à la relaxation mais aussi pour refroidir par évaporation. De nos jours l'eau est utilisée comme une des stratégies de climatisation passive. Les dispositifs favorisant l'évaporation sont de plus en plus utilisés, on voit naître alors les brumisateurs, tour de refroidissement, etc.

A leur tour, les étendues d'eau stockent d'importantes quantités de chaleur avec aisance. Elles agissent comme tampon thermique qui emmagasine et restitue peu de chaleur lentement. La grande capacité thermique de l'eau là rend peu sensible aux variations de températures de l'atmosphère.

L'effet de l'eau sur microclimat et l'amélioration des conditions climatiques est régi par plusieurs paramètres :

- La latitude, la saison et la direction de vents pour les grandes surfaces d'eau ; mers et océans.
- le volume d'eau
- La taille du plan d'eau (par exemple la température des eaux d'un lac ou étang augmente du centre vers la périphérie en saison chaude)
- En cas de sources ponctuelles, les faibles surfaces d'échanges ne permettent pas un rafraichissement, alors qu'à proximité des jets d'eau, l'effet d'humidification et rafraichissement est ressenti.

Toutes ces techniques, ont été développées en réponse à une recherche constante du bien-être. Un bien-être qui reste assez subjectif, défini et perçu par différentes manières. Chose que nous allons essayer de cerner dans le chapitre qui suit.



# **CHAPITRE III:**

**BÂTIMENT ET CONFORT THERMIQUE**



*“Tester la qualité du monde sensible, c’est d’abord voir comment il assure effectivement le bon fonctionnement de notre organisme. La première exigence est l’aptitude des gens à utiliser leurs différents sens : sentir, voir, toucher et entendre. Il est important que la sensation soit intense informative, agréable et soumise au contrôle de celui qui l’éprouve” [K.Lynch, 1982]*

Fig. n°III.1: Illustration eau, couleur ciel et paysage.

Source : <http://www.casaluisbarragan.org>

## **Introduction**

Actuellement, le confort thermique constitue une demande reconnue et justifiée dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant.

Le confort est une notion globale, Chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure et autres, sont les éléments qui définissent plusieurs paramètres climatiques, esthétiques et psychologiques du confort. Le confort est également une sensation subjective, il est la combinaison de facteurs physiques, physiologiques et psychologiques qui varient d'un individu à un autre et qui lui permettent d'atteindre une sensation de bien être.

Dans ce chapitre nous allons aborder les connaissances existantes en matière de confort thermique et hygrothermique. Cela nous permettra de comprendre l'importance de chacune des notions et la difficulté de leur appréhension. Les différents mécanismes mis en jeu, seront détaillés afin de cerner le rôle des différents paramètres physiques, physiologiques et psychologiques dans la perception thermique de l'homme.

## I. Définition du confort thermique :

Les auteurs sont nombreux et convergent généralement vers le point de vue qu'une ambiance confortable est une ambiance pour laquelle l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle (homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible, donc désagréable, ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid [Depecker *et al.* 1989].

Le confort thermique de l'être humain correspond à une motivation simple mais permanente qui le pousse à rechercher, voire créer, certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en terme d'agrément ou de désagrément [Galeou *et al.* 1989]. La définition la plus large est celle proposée par l'ASHRAE<sup>1</sup> puisqu'elle considère que le confort thermique est atteint lorsque l'individu exprime une satisfaction au sujet de son environnement [ASHRAE 1993b].

Cependant, d'autres auteurs affirment que le confort n'est pas forcément lié au maintien permanent de la neutralité thermique, mais qu'il peut aussi résulter de l'alternance de stimuli qui se compensent, à condition que le sujet en ait une maîtrise parfaite [Hofmann 1994] et que pour d'autres encore, des variations de confort, en fonction de la localisation de l'individu et de l'instant de la journée, sont nécessaires dans les espaces publics [Teller 1998].

Globalement, le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par de nombreux facteurs, conduisant l'individu à exprimer le bien-être de son état. La sensation de confort thermique reste cependant une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents [Depecker *et al.* 1989].

Des travaux récents sur la notion de confort adaptatif mettent en avant ces variations individuelles, conduites par des stratégies personnelles qui peuvent être d'ordre physiologique, psychologique, sociale, culturelle ou comportementale [Humphreys *et al.* 1998].

Malgré la complexité évidente d'appréhension de cette notion, il est possible d'estimer des circonstances dans lesquelles aucune situation de confort n'est atteinte (stress thermique) et il est également envisageable de comparer deux états de confort en termes relatifs, comme par exemple, la variation du niveau de confort dû à un nouvel aménagement. C'est pourquoi, nous ne pouvons faire autrement que d'approcher la sensation de confort

---

<sup>1</sup> ASHRAE : Association américaine des ingénieurs de chauffage et de climatisation.

thermique à travers la connaissance des différents échanges thermiques entre l'individu et son environnement.

Ainsi, nous entamons cette partie par l'analyse des différents paramètres relatifs à l'environnement et à l'individu. Nous présentons quelques rappels sur des éléments de physiologie humaine (Températures internes et cutanées, mécanismes de thermorégulation et comportement du corps en régime transitoire). Nous pouvons alors définir les échanges thermiques entre l'homme et son milieu. Certains indices permettent d'approcher et de quantifier la part objective ou quantifiable du confort thermique à l'intérieur du bâtiment, nous en présenterons les principaux en essayant d'insister sur leurs spécificités.

## **II. Les paramètres du confort :**

Les relations entre l'individu et son environnement sont déterminantes dans l'estimation des situations de confort. Avant de présenter les différents indices de confort en espace intérieur et extérieur, nous commençons par détailler les différents paramètres qui interviennent.

### **II.1 Paramètres relatifs à l'environnement (physiologiques):**

Dans la description des éléments concernant le confort thermique d'intérieur, la prise en compte de l'environnement relatif à l'individu nécessite la connaissance précise de quatre paramètres microclimatiques importants :

#### **II.1.1 Température de l'air :**

La température sèche de l'air extérieur dépend du lieu et est influencée par la latitude, l'altitude ; l'ensoleillement et les conditions géographiques (vent, proximité des mers, lacs, végétation...) sa mesure exige un parfait affranchissement du rayonnement thermique quelque soit sa source [porcher, 1975]

Au niveau respiratoire, la différence de la température entre l'air inspiré (ambient) et l'air expiré, détermine le sens des pertes thermiques. Tandis qu'au niveau de la peau c'est la différence entre l'air ambient et la peau ou entre cette dernière et la couche d'air sous les vêtements qui nous le permettent. [Boutebba. D-S, 2007]

#### **II.1.2 Humidité de l'air :**

L'humidité de l'air influence les échanges de chaleur dus à l'évaporation de l'eau par voies respiratoires et cutanée. L'humidité relative de l'air est le rapport décrit en pourcentage de

la pression partielle de vapeur de l'air humide à une température donnée, à la pression partielle de vapeur saturante à la même température. Elle est étroitement liée à la température sèche de l'air [Porcher G, 1975]

### **II.1.3 Vitesse de l'air**

La vitesse du vent est le déplacement horizontal d'une masse d'air pendant une durée donnée, elle est quantifiée en mètres par seconde, kilomètres par heure, nœuds.etc [Boutebba. D-S, 2007]

La vitesse de l'air accélère les échanges par convection, et qui peuvent se multiplier avec une simple augmentation de 0 à 2m/s. elle participe aussi à l'évaporation de la fraction de surface cutanée mouillée en éliminant la sueur pour garder la peau fraîche et sèche. Mais dès que cette vitesse excède un certain niveau relatif à l'activité exercée, il peut apparaître une gêne relative au confort aéraulique [Gandmer J, 1986]

### **II.1.4 Température radiante moyenne( $T_r$ )**

La température moyenne de rayonnement peut être définie comme étant la quantité moyenne du flux de chaleur par rayonnement, qu'un individu échange avec son environnement [Boutebba D.S, 2007].

Les températures des parois ont des températures différentes et s'échangent ainsi une quantité de chaleur par rayonnement. Ce phénomène se produit aussi pour une personne (par sa température cutanée). Les principaux paramètres qui régissent les échanges en milieu intérieur sont :

L'angle solide sous lequel cette personne voit ces surfaces, la distance qui la sépare d'elle et la différence de la température entre elle et ces parois.

## **II.2 Paramètres relatifs à l'individu (physiques)**

### **II.2.1 Mécanismes de thermorégulation**

L'homme est un être homéotherme. Sa température interne doit être comprise entre 36.8 °C et 37.2°C pour un individu au repos et elle doit être comprise entre 37.0 °C et 37.5 °C pour un individu au travail [Galeou et al. 1989].

Le corps humain tend à maintenir constante sa température interne à environ 37 °C, cependant on peut relever trois éléments qui peuvent faire varier cette valeur : une variation diurne d'environ 1 °C, l'activité (variation linéaire de 37 °C au repos à 38.5 °C pour 500 W/m<sup>2</sup> [Mc Intyre 1980] )et la température ambiante(l'amplitude de variation peut

être de 1°C pour des changements de température compris entre 30 et 48 °C [Stolwijk et al. 1966]). Lorsque le corps est soumis à des conditions thermiques défavorables, des mécanismes de régulation apparaissent. Ainsi, en condition froide, le corps peut lutter en générant un mécanisme thermo protecteur qui est le frisson.

Les deux mécanismes de thermorégulation en situations chaudes sont la vasodilatation et la transpiration. La vasodilatation est un phénomène permettant une augmentation du transfert de chaleur entre la peau et l'extérieur. L'augmentation du débit sanguin, jusqu'à dix fois dans l'ensemble du corps et 30 fois dans les mains, entraîne une modification de la « conductivité apparente », pouvant aller jusqu'à 55 W/m<sup>2</sup>. °C [Stolwijk 1966]. Ce mécanisme a une faible efficacité, il ne peut compenser qu'un degré d'élévation de température ambiante entre 30 et 34°C.

La transpiration, grâce à l'évaporation de la sueur, est le principal mécanisme de thermorégulation. Chez l'homme exposé à la chaleur la production et l'évaporation de la sueur représentent le mécanisme thermorégulateur le plus puissant et à la limite, le seul efficace pour lutter contre l'hyperthermie. L'évaporation fatigue l'organisme parce qu'elle entraîne une perte importante d'eau et d'électrolytes (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> : désodification), alors que la perspiration n'engendre qu'une perte d'eau [Lemaire 1966].

## II.2.2 Le métabolisme

L'homme produit une certaine quantité de chaleur en fonction de son activité que l'on appelle production métabolique. Le métabolisme peut se décomposer en une partie purement thermique (M<sub>th</sub>) et une partie « mécanique » (W) :

$$M = M_{th} + W$$

Le rendement mécanique ( $\eta_w = W/M$ ) n'excède pas 0.2. Des valeurs du métabolisme sont répertoriées pour différentes activités (Tableau 01), pour un sujet standard (70 kg et surface de corps sD : 1.8 m<sup>2</sup>) [Depecker et al. 1989].

Activité	M (W)	M <sub>th</sub> (W)	W (W)
Sommeil	75	75	0
Assis, au repos	105 - 110	105 - 110	0
Secrétariat	125	125	0
Danse slow	125	125	0
Assis, écriture	125	125	0
Debout, relax	125 - 130	125 - 130	0
Travail de laboratoire	170	170	0
Enseignement	170	170	0
Activité dans la maison	180	180	0
Debout, travail léger des bras	180	160	20
Vente	210	200	10
Marche (1.6 km/h) pente 5 %	250	230	20
Travail sur machine outil	290	260	30
Gymnastique	360	330	30
Marche rapide(4.8 km/h pente 5 %)	420	375	45
Travail de pelletage	460	390	70
Danse rock	460	460	0
Tennis	480	450	30
Creusement de tranchées	630	510	120
Marche forcée(6.4 km/h pente 5 %)	640	580	60
Squash	750	700	50
Basket ball	790	750	40

Tableau II.1 : Métabolisme thermique et énergie mécanique - Source Depecker et al, 1989

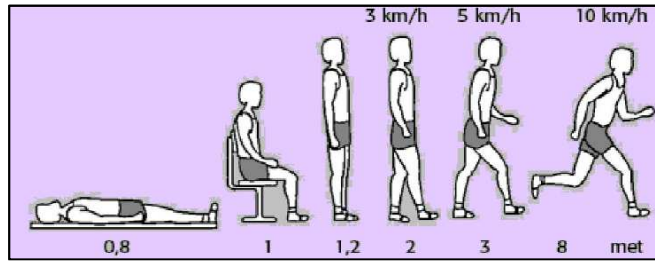


Fig. n°II.2 : Production de la chaleur selon l'activité - Source guide technique de la diffusion d'air, 2006 cité par Boulfani, 2010

### II.2.3 Les vêtements

Les difficultés à définir les caractéristiques thermiques des vêtements sont nombreuses et représentent un problème lors des prévisions de confort. La résistance thermique du vêtement aux transferts de chaleur ( $I_{cl}$  ou  $R_v$ ) est souvent exprimée dans une unité que l'on note clo (1 clo = 0.155 m<sup>2</sup>.K/W). Un clo représente l'isolation apportée par une tenue d'intérieur typique d'hiver. L'isolation thermique d'un vêtement peut être soit mesurée, soit calculée en cumulant l'isolation des différentes parties du vêtement [Sprague et al. 1974] :

$$\text{Hommes : } I(\text{ens}) = 0.113 + 0.727 \sum I(\text{pièces}) \text{ [clo]}$$

$$\text{Femmes : } I(\text{ens}) = 0.05 + 0.77 \sum I(\text{pièces}) \text{ [clo]}$$

On retrouve une formule simplifiée dans la norme ASHRAE 55-81 :

$$I(\text{ens}) = 0.82 \sum I(\text{pièces})$$

Les valeurs des isolations thermiques de la plupart des vêtements sont données (Tableau III.2) ainsi que les valeurs moyennes de l'ensemble des vêtements dans des situations courantes (Tableau III.3) [Depecker et al. 1989].

Vêtements d'hommes	$I_{cl} \cdot 10^4$	Vêtements de femmes	$I_{cl} \cdot 10^4$
Maillot de corps	93	Slip	20
Tee shirt	140	Soutien-gorge	60
Slip	80	Combinaison courte	200
Tee shirt à manches	155	Combinaison longue	300
Caleçon long	155	Tee shirt à manches	310
Chemise légère		Blouse légère	310
manches courtes	220	Blouse chaude	450
manches longues	340	Robe légère	340
Chemise chaude		Robe chaude	1080
manches courtes	390	Jupe légère	155
manches longues	450	Jupe chaude	340
Veste légère	230	Pantalon léger	400
Veste chaude	450	Pantalon chaud	680
Pantalon léger	250	Pull over léger	260
Pantalon chaud	500	Pull over chaud	570
Pull over léger	310	Cardigan léger	260
Pull over chaud	350	Cardigan chaud	570
Cardigan léger	340	Bas	16
Cardigan chaud	570	Collant	18
Chaussettes	60	Chaussures	
Chaussettes montantes	155	sandales	30
Chaussures		escarpins	60
sandales	30	bottes	125
mocassins	60		
bottes	125		

Tableau III.2 : valeurs de résistances propres  $I_{cl}$  de quelques vêtements - Source Depecker et al, 1989 cité par Vinet, 2000



Eté $R_v$ ( $m^2\text{°C/W}$ )	Printemps – Automne $R_v$ ( $m^2\text{°C/W}$ )	Hiver $R_v$ ( $m^2\text{°C/W}$ )
0.08	0.109	0.158
0.166	0.213	0.225

Tableau III.3 : valeurs moyennes (hommes et femmes) des Icl .  
Source Depecker et al, 1989 cité par Vinet, 2000

Signalons aussi que le vêtement joue un rôle complexe en absorbant de la sueur. Celle-ci s'évapore ensuite dans son épaisseur, donc avec un moindre rendement pour le refroidissement du corps. Cependant ce phénomène est compensé au moins en partie par l'augmentation de la conductivité thermique du vêtement humide, de sorte que l'hypothèse selon laquelle on considère que la sueur s'évapore directement sur la peau, peut être adoptée en pratique [Nishi et al. 1970]

#### II.2.4 Les échanges thermiques

Nous allons brièvement passer en revue les différents transferts de chaleur sensible (échanges radiatifs et convectifs) ainsi que les pertes par respiration, par diffusion et par sudation.

L'équilibre du bilan thermique sur un individu peut être calculé en connaissant ou en estimant un certain nombre de paramètres. Dans les différentes analyses réalisées, la description mathématique des termes entrant dans le bilan énergétique de l'individu est une combinaison d'équations ou de relations empiriques (coefficients d'échange et certains paramètres physiologiques).

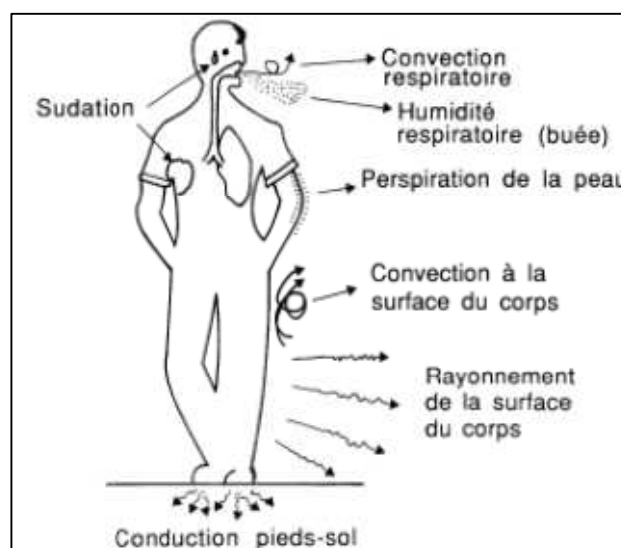


Fig. n° III.3: les différents types d'échanges thermiques.  
Source Depecker et al, 1989 cité par Vinet, 2000

L'équation du bilan thermique appliquée à l'individu est la suivante [ASHREA ,1997 cité par Moudjalled, 2007] :

$$M-W=Q_{SK}+Q_{RES}+S$$

$$= (C+R+K+E_{sk})+(C_{res}+E_{res})+S_{sk}+S_e \quad Eq(III.3)$$

M : taux du métabolisme, W/m<sup>2</sup>

W : travail externe, W/m<sup>2</sup>

Q<sub>res</sub> : Flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m<sup>2</sup>

Q<sub>sk</sub> ; flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m<sup>2</sup>

C<sub>res</sub> : flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m<sup>2</sup>

E<sub>res</sub> : flux de chaleur échangé par évaporation transpiratoire, W/m<sup>2</sup>

C : flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>

R : flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>

K : flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>

E<sub>sk</sub> : flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>

S<sub>cr</sub> : taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m<sup>2</sup>

S<sub>sk</sub> : taux de chaleur stockée dans la peau, W/m<sup>2</sup>

#### II.2.4.1 Les échanges radiatifs :

a) Rayonnement de grande longueur d'onde :

Le calcul de ce type d'échanges entre l'individu et son environnement peut se faire grâce à la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\phi_{GLO} = F_{eff} F_{cl} \varepsilon \sigma [(T_{cl} + 273.2)^4 - (T_{mrt} + 273.2)^4] \quad Eq(III.4)$$

Dans cette équation  $F_{eff}$  représente le facteur de surface effective de rayonnement qui est le rapport entre la surface effective de rayonnement de l'individu et sa surface totale, on adopte en pratique une valeur de 0.7.  $\varepsilon$  est l'émissivité moyenne de la peau et des vêtements dans l'infrarouge lointain, soit environ 0.97. A titre d'exemple, pour une personne vêtue d'une tenue d'été dont la température de surface extérieure est de 26°C et dans une ambiance dont la température radiante moyenne  $t_{mrt}$  équivaut à 22 °C, les pertes par rayonnement sont égales à 18 W/m<sup>2</sup> [Hofmann 1994].

b) Rayonnement de courte longueur d'onde :

Ce flux de chaleur inclut la fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident ( $S_{\downarrow}$ ) qui est directement absorbée par la peau :

$$\phi_{CLO} = ((1-\alpha_{sk}) * \tau_{cl} * S_{\downarrow}) / F_{cl} \quad Eq (III.5)$$

Avec  $\tau_{cl}$  le coefficient de transmission du vêtement,  $\alpha_{sk}$  l'abédo solaire de la peau et  $F_{cl}$  la

fraction entre la surface du vêtement et la surface de la peau, ce qui permet de calculer le flux de chaleur par unité de surface de peau. Les apports dus aux réflexions sur les parois et la fraction du rayonnement solaire qui est absorbée par le vêtement ne sont pas considérés dans cette expression.

*II.2.4.2 Les échanges par convection :*

Un phénomène de convection naturelle apparaît lorsque sous l’effet d’une différence de densité de l’air due à une différence de température, un courant d’air se met en place. C’est ce qui se passe, au voisinage de la peau, lorsque celle-ci est à une température supérieure à celle de l’air ambiant. Lorsque l’air est en mouvement sous l’action d’une force externe, on emploie le terme de convection forcée. Plus la vitesse de l’air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants.

Les équations qui régissent ce type de phénomènes sont complexes et ne donnent lieu à des résultats analytiques que pour très peu de configurations. Afin d’estimer ces échanges, il est d’usage d’introduire un coefficient de convection que l’on note  $h_c$ . Ainsi, nous pouvons estimer le terme convectif par l’équation suivante :

$$\phi_{conv} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \tag{Eq (III.6)}$$

La norme ISO 7730 adopte pour valeur de  $h_c$  la plus grande des deux valeurs suivantes :

en convection naturelle :  $h_c = 2.38 (T_{cl} - T_a)^{0.25}$

en convection forcée :  $h_c = 12.1 U^{0.5}$

Avec  $U$  : vitesse relative de l’air par rapport à la personne.

Dans la littérature, les valeurs des coefficients d’échange convectif donnent lieu à de nombreuses corrélations. De plus, en espace extérieur, des vitesses de vent élevées peuvent apparaître. Des formules sont répertoriées pour le calcul de ce terme pour différentes vitesses de vent (Tableau 04).

Vitesse de vent (U en m.s <sup>-1</sup> )	U < 0.1	0.1 < U < 2.4	2.4 < U
Echange par convection (W.m <sup>2</sup> )	2.05 f <sub>cl</sub> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> ) <sup>1.25</sup>	10.4 f <sub>cl</sub> V <sup>0.5</sup> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> )	8 f <sub>cl</sub> V <sup>0.8</sup> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> )

Tableau III.4 : échange par convection.  
Source Pénicaud, 1978 cité par Vinet, 2000

Le rôle de la turbulence dans les transferts de chaleur est également à considérer. En effet, grâce à une approche expérimentale, le rôle très marqué de la fluctuation du vent sur l’amélioration des transferts thermiques a été mis en évidence [Moreau 1999].

### II.2.4.3 Pertes par respiration :

L'air à la sortie des poumons est pratiquement saturé en humidité. Les poumons fonctionnent comme un échangeur de surface quasi infinie, d'environ 100 m<sup>2</sup>. L'air expiré est quasiment saturé d'humidité. En ambiance sèche, la quantité de vapeur d'eau expirée est de l'ordre de 30 g/h. En climat chaud et humide, elle est réduite à une valeur variant de 0 à 20 g/h. Les pertes apparaissent sous deux formes : pertes par chaleur sensible dues au réchauffement de l'air inspiré et pertes par chaleur latente dues à l'humidification de celui-ci.

$$\phi_{res} = 0.0014 * M * (34 - T_{air}) \quad Eq (III.7)$$

$$E_{res} = 0.0173 * M * (5.87 - HR_a * P_v(T_{air})) \quad Eq (III.8)$$

Avec, M en W/m<sup>2</sup>, T<sub>air</sub> et HR<sub>a</sub> la température sèche et l'humidité relative de l'air, et P<sub>v</sub>(T<sub>air</sub>) la pression de vapeur d'eau à la température T<sub>a</sub> exprimée en kPa

### II.2.4.4 Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau

La perte de chaleur par évaporation est un mécanisme de régulation très efficace et constitue le meilleur indice physiologique de stress thermique. La perte de chaleur par évaporation à la surface de la peau Esk oscille entre deux niveaux : une valeur minimum d'évaporation diffuse (E<sub>dif</sub>) et une valeur maximale (E<sub>max</sub>) lorsque 100 % de la peau est couverte de sueur. Ce type de pertes dépend des mouvements d'air, du gradient de pression de vapeur entre la surface de la peau à travers les vêtements et l'air ambiant, ainsi que de la résistance au transfert de masse de vapeur d'eau due aux vêtements.

Les pertes par diffusion, également appelées pertes par perspiration, sont permanentes et ne dépendent que de l'écart de pression de vapeur d'eau au niveau des pores de la peau, à saturation et à la température de la peau, et dans l'air ambiant. Elles représentent environ 6 % de la dissipation maximale de chaleur par évaporation. Pour des valeurs élevées de E<sub>max</sub> ou des expositions longues en ambiance d'humidité faible, le taux précédent peut baisser jusqu'à 2%. Il est possible de les évaluer à partir de la formule suivante [Mc Intyre 1980] :

$$E_{dif} = 4 + 0.12 (p_{ssk} - p_a) \quad Eq (III.9)$$

Avec :

p<sub>ssk</sub> : pression saturante de la vapeur d'eau à la température de la peau [Pa]

p<sub>a</sub> : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'ambiance [Pa]

#### II.2.4.5 Pertes thermiques par sudation

L'évaporation totale d'eau à partir de la peau est un phénomène de transfert de masse de la vapeur d'eau depuis la surface vers l'air ambiant. Elle est le résultat de quatre processus : sécrétion de la sueur par des glandes sudoripares à proximité de la peau, transport de la sueur jusqu'à la surface de la peau, dispersion en une pellicule sur la peau et évaporation de cette pellicule à la température de la peau. Le moiteur de la peau est le rapport entre le taux de sécrétion requis pour assurer un bilan nul et l'évaporation maximale possible dans l'air ambiant.

La perspiration des individus existe toujours et est au minimum de 6 %. En dessous de 12 % la moiteur n'est pas perceptible et le corps semble sec. De 12 à 30%, le corps ressent une faible moiteur puis des zones humides apparaissent. Au-delà de 30 % l'efficacité de la sueur tombe en dessous de 1 car les gouttes de sueur de grandes tailles ne peuvent pas s'évaporer [Berger 1998]. L'inconfort augmente avec la valeur de cet indice qui avertit le corps d'un recours à un processus de sueur. Dans le cas d'une peau entièrement saturée d'eau, la valeur maximale de l'évaporation s'écrit :

$$E_{\max} = h_e (p_{\text{ssk}} - p_a) \quad \text{Eq (III.12)}$$

Le coefficient d'échange thermique par évaporation  $h_e$  (W/m<sup>2</sup>.Pa) peut s'exprimer à partir de la relation de Lewis en fonction du coefficient d'échange convectif  $h_c$  et d'une constante  $L_r$  qui dépend des substances en présence et de la pression atmosphérique :

$$h_e = L_r \cdot h_c \quad \text{Eq (III.13)}$$

En pratique, la peau n'est pas intégralement mouillée, à la fois parce que le corps fait rarement appel à ses capacités maximales de sudation et parce que les glandes sudoripares ne sont pas uniformément réparties. L'évaporation réelle de la peau, qui est la somme des pertes par diffusion et par transpiration «régulatrice» ( $E_{\text{dif}} + E_{\text{rsw}}$ ), s'écrit :

$$E_{\text{sk}} = \omega L_r h_c (p_{\text{ssk}} - p_a) \quad \text{Eq (III.14)}$$

$\omega$  est un coefficient adimensionnel qui caractérise la mouillure cutanée. Il est égal au rapport entre l'évaporation réelle et l'évaporation maximale :

$$\omega = E_{\text{sk}} / E_{\max} \quad \text{Eq (III.15)}$$

#### II.2.5 Les indices de confort thermique

Afin de quantifier le confort thermique, de nombreux travaux, généralement réalisés à l'intérieur des bâtiments, dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées, ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices. [Vinet. J, 2000]

### II.2.5.1 Les inconforts locaux :

Les sources locales d'inconfort sont nombreuses et parmi les plus fréquemment citées, nous pouvons relever l'asymétrie de rayonnement horizontale et verticale, le gradient vertical de température d'air, la sensation de courant d'air, un air respiré trop chaud ou trop froid, des extrémités froides du corps, une humidité excessive ou insuffisante, des différences de température d'air le long du corps.

#### II.2.5.1.1 Asymétrie de rayonnement :

Les parois froides ou chaudes entraînent des déséquilibres au niveau des échanges radiatifs qui peuvent engendrer une sensation d'inconfort. On considère qu'il n'y a pas de gêne si, à 1 m devant la façade, l'écart entre la température radiante orientée vers cette façade et la température radiante orientée vers la cloison opposée ne dépasse pas 8 °C [Chemillier 1986]. Dans la figure ci-dessous (Fig.III.4), l'asymétrie de rayonnement est liée au pourcentage de personnes insatisfaites (sujet assis, vêtu 0.6 clo) à partir de travaux réalisés par Fanger (source ASHRAE). L'asymétrie de température rayonnante due à des surfaces verticales froides doit être inférieure à 10 °C. L'asymétrie de rayonnement due à un plafond chauffant doit être inférieure à 5°C. [Vinet. J, 2000]

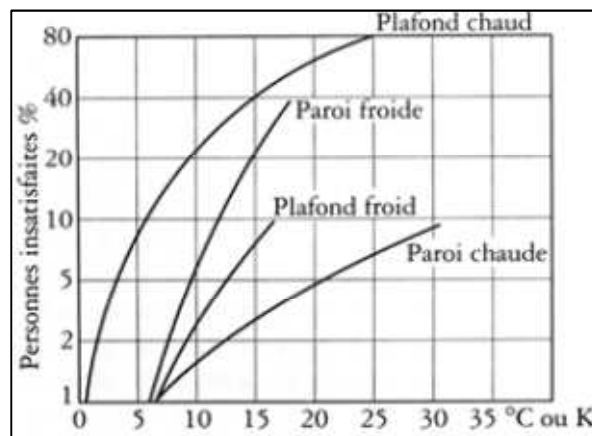


Fig. n°III.4 : asymétrie du rayonnement et insatisfaction. Source Vinet. J, 2000

#### II.2.5.1.2 Température du sol

Une température de sol trop élevée ou trop basse entraîne un inconfort au niveau des pieds. Une température de sol inférieure à 17 °C ou supérieure à 26 °C procure un inconfort [Brindel-Beth et al. 1998]. D'après Olesen, une température optimale de sol est de 23 °C

pour un individu chaussé debout et 25 °C pour un individu chaussé assis, mais ces résultats sont fortement dépendants de la température d'air [Hoffmann 1994].

a) Gradient vertical de température :

Dans les bâtiments on considère généralement que l'écart entre les températures mesurées à 1.10 m et à 0.10 m doit rester inférieur à 3°C [Chemillier 1986].

II.2.5.1.3 Courant d'air :

Ce point est considéré comme la principale source d'inconfort local. Un écoulement à vitesse fluctuante est plus inconfortable qu'à vitesse constante. A l'intérieur des bâtiments, dans tous les cas la vitesse de l'air doit être inférieure à 0.35 m.s-1 [Chemillier 1986]. Dans la norme ISO 7730-93, une équation relie le pourcentage d'insatisfaits (PD) aux caractéristiques du courant d'air [Hoffmann 1994] :

$$PD = (34 - T_{air}) (U - 0.05) 0.622 (37 \sigma + 3.14) \quad Eq (III.16)$$

Avec :

$t_a$  : température d'air,

$U$  : vitesse moyenne de l'air

$\sigma$  : écart type des vitesses d'air ou turbulence absolue

Ces résultats concernent des individus sédentaires en tenue courante, sachant que la sensibilité au courant d'air décroît avec une isolation des vêtements plus importante. Pour des personnes actives le courant d'air est plutôt un facteur de confort. Cependant des auteurs aboutissent à des résultats différents puisque Mayer a montré que la proportion d'insatisfaits croît linéairement en fonction de la vitesse d'air pour une intensité de turbulence jusqu'à 40 % et en fonction de la turbulence absolue au-delà [Mayer 1985]. Des recherches dans ce domaine sont en cours.

II.2.5.2 *Les indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur*

II.2.5.2.1 Indice de la « Température Résultante » :

Cet indice, également appelé température opérative, combine la température d'air, supposée égale à celle des parois, l'hygrométrie sous forme de la température humide, la vitesse d'air et l'influence du métabolisme et des vêtements [Missenard, 1972]. Il est défini comme la température d'une ambiance saturée d'humidité et en air calme qui procure la même sensation que celle étudiée dans le cadre explicite d'une équivalence de passage ou de séjour.

La température résultante sèche correspond à la température d'une ambiance dans laquelle le corps humain a les mêmes pertes par rayonnement et par convection que dans l'ambiance étudiée. En air calme, c'est-à-dire  $U < 0.2$  m/s et lorsque  $|T_{mrt} - T_{air}| \leq 4$  K :

$$Trs = \frac{T_{mrt} + T_{air}}{2} \quad Eq (III.17)$$

Lorsque l'air s'écoule à une vitesse  $U$ , d'au moins 0.1 m/s, l'expression devient [Hofmann 1994]:

$$Trs = \frac{T_{mrt} + T_{air} \cdot \sqrt{10 \cdot U}}{1 + \sqrt{10 \cdot U}} \quad Eq (III.18)$$

#### II.2.5.2.2 Indice de la « Température Effective » et ses dérivées :

Cet indice intègre également la température, l'humidité et la vitesse de l'air. L'impression thermique instantanée, éprouvée par le sujet dès son introduction dans une ambiance donnée, est le critère de réaction retenu pour cet indice. L'indice de Température Effective original ne tient pas compte des effets du rayonnement ; il est néanmoins possible de substituer la température prise au thermomètre à globe à la température de l'air. Deux abaques ont été développés : l'un pour des sujets nus jusqu'à la ceinture et l'autre pour des sujets portant des vêtements d'intérieur ordinaires.

La température standard effective est définie comme la température d'un environnement isotherme dont les températures de surface et d'air sont équivalentes, où l'humidité relative est de 50 % et l'air calme (0.12 m/s). Dans cet environnement une personne ayant une isolation de vêtement standard subit les mêmes pertes de chaleur et possède la même température moyenne de peau et la même mouillure cutanée que dans l'environnement réel et avec des vêtements pas nécessairement standards. Le niveau d'activité est le même dans la situation réelle et dans la situation standard, et l'isolation standard des vêtements est une fonction du niveau d'activité. Lorsque l'environnement ne permet pas un équilibre rapide, il est usuel d'envisager l'état après une heure d'exposition.

L'évaluation du SET requiert deux étapes. La première est de trouver la température de la peau et la mouillure cutanée de l'individu à partir du modèle de thermorégulation à deux nœuds [Gagge et al. 1986]. La deuxième étape consiste à trouver la température d'un environnement standard qui génère les mêmes valeurs de température et de mouillure à partir de l'analyse des transferts de chaleur du corps. L'indice SET est donc fonction du niveau d'activité, des caractéristiques d'isolation des vêtements et des variables physiques



de l'environnement. La valeur de SET est directement liée à la sensation et non à la température de l'air, la correspondance est donnée ci-dessous (Tableau 17) [Mc Intyre 1980]:

SET (°C)	Sensation	Etat physiologique d'un individu sédentaire
> 37.5	Très chaud, inconfortable	Défaillance de la régulation
34.5 – 37.5	Chaud, très inacceptable	Sueur abondante
30.0 – 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sueur
25.6 – 30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sueur faible, vasodilatation
22.2 - 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5 – 22.2	Légèrement frais, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5 – 17.5	Frais et inacceptable	Refroidissement lent du corps
10.0 – 14.5	Froid et très inacceptable	Frisson

Tableau III.5 : Correspondance entre SET sensation et état physiologique [Mc Intyre 1980]

La nouvelle température effective standardisée SET\*, est la valeur de SET lorsque l'individu adapte ses vêtements à son activité [Gagge et al. 1986].

$$I_{cl} = \frac{1.33}{M-W+0.74} - 0.995 \quad Eq (III.19)$$

M et W s'expriment en met, I<sub>cl</sub> en clo. Cet indice est donc plus général, cependant il impose l'individu d'être vêtu de manière adéquate, ce qui n'est pas toujours évident.

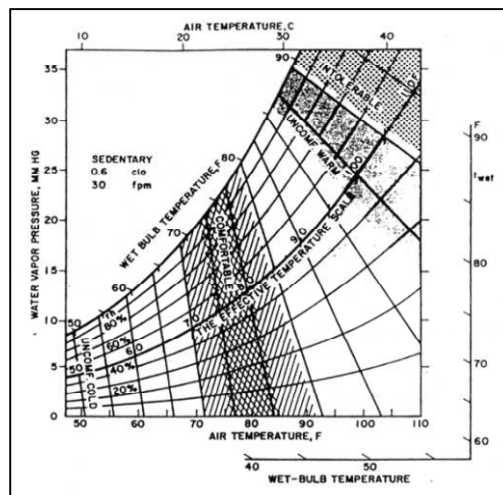


Fig. n°III.5 : zone de confort pour la nouvelle température effective. Source Hofmann, 1994

### II.2.5.2.3 Les indices DISC

Parmi les indices de stress thermique basés sur la mouillure cutanée ( $\omega$ ) et sur le débit sudoral, facteurs physiologiques importants dans les climats chauds, il est possible de citer le DISC [Winslow et al. 1937] dont la définition est la suivante [Gagge et al. 1986] :

$$DISC = 5 \frac{W - W_0}{W_{crit} - W_0} \quad Eq (III.20)$$

L'inconfort est mesuré sur une échelle allant de 0 à 5 : 0 à la neutralité (celle-ci correspondant à une mouillure  $\omega_0$  qui n'est voisine de 0 qu'au repos et qui augmente avec le métabolisme), quand la mouillure atteint le point critique  $\omega_{crit}$  au-delà duquel les mécanismes de thermorégulation cessent d'être efficaces. Gagge propose  $\omega_{crit} = 85 \%$ .

Des zones de confort (1 : agréable, 2 : légèrement agréable, 3 : désagréable et 4 : très désagréable) ont été estimées par Fauconnier et son équipe, en fonction des variations de la mouillure cutanée et du débit sudoral (activité et type de vêtement non précisés) (Tableau 07d'après [Vinet. J, 2000]) :

Mouillure Cutanée	25 %	4	4	4	4
	15 %	3	3	3	4
	6 %	2	2	2	4
		1	2	3	4
		0	50	100	250
Débit sudoral g/h					

Tableau III.6 : Débit sudoral, mouillure cutanée et confort. Source Vinet, 2000

A partir de ce tableau, on constate qu'au-delà de 25 % de mouillure cutanée, l'individu est dans la zone très désagréable. On considère que 75 % est la limite maximale d'inconfort.

D'autres indices DISC ont également été proposés (Tableau III.7 d'après [Pignolet 1996])

Auteurs	Met	Clo	Equations
Gonzalez (1978)	3	0.5	$DISC = 2.4 \omega - 0.1$
Berglund (1984)	1	0.4 – 0.9	$DISC = 4.13 \omega + 0.013$
Cunningham (1985)	1	0.4 – 1.2	$DISC = 5.06 \omega + 0.09$
Hoeppel (1985)	1 et 5	0.64	$DISC = 3.6 \omega + 0.25$
Sangkertadi (1994)	1.1	0.5	$DISC = 3.938 \omega + 0.0158 E_{sd} - 0.3348$

Tableau III.7 : Indices DISC. Source Pignolet, 1996

#### II.2.5.2.4 Le PMV et ses dérivés

Cet indice est certainement le plus connu et le plus utilisé en thermique du bâtiment. En effet, la norme ISO 7730-93 adoptée en 1984 et révisée en 1993, s'intitulant « Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV (predicted mean vote) et PPD (pourcentage prévu des insatisfaits) et spécification des conditions de confort thermique », s'appuie sur les travaux de Fanger. La première exigence est l'existence d'un équilibre thermique : bilan thermique nul (états stationnaires : sensation de séjour). L'équation relie

les paramètres classiques que sont la température de l'air, la température radiante moyenne, l'hygrométrie, la vitesse de l'air, le métabolisme et la résistance thermique des vêtements. De plus, deux paramètres physiologiques s'ajoutent, la température moyenne de la peau et l'évacuation de la chaleur par sudation. Au total, 1396 sujets ont été sur 8 niveaux d'activité, 9 valeurs de vitesse d'air, 7 valeurs relatives aux vêtements, de nombreuses valeurs de température ambiante, 1 valeur d'humidité 50 %. Des courbes de régression ont pu être déterminées :

$$T_{sk} [^{\circ}\text{C}] = 35.7 - 0.0275 M [\text{W}/\text{m}^2] \quad Eq (III.21)$$

$$E_{rsw} [\text{W}] = 0.42 A_{Du} \cdot (M - 58) \quad Eq (III.22)$$

Ces deux équations exprimant la sensation de confort (assimilée à la notion de neutralité thermique) sont combinées avec le bilan thermique pour donner l'équation de confort.

Un certain nombre de remarques critiques sont à apporter à ces résultats [Hofmann 1994]. En effet, les régressions linéaires de la température cutanée et de l'évaporation régulatrice sont faites à partir de nuages de points très étalés et basés pour quelques cas tests sur quelques dizaines d'individus seulement. De même, les lois décrivant les différents types d'échanges thermiques ont été déterminées à partir d'un petit nombre de travaux (parfois d'un seul).

#### II.2.5.2.5 L'indice PET - Température Physiologique Équivalente :

L'indice *PET* pour un lieu donné (intérieur ou extérieur) est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer. [Vinet. J, 2000]

L'indice *PET* est basé sur le modèle de bilan d'énergie *MEMI* (Munich Energy balance Model for Individuals).

Pour résoudre l'équation du bilan, la température moyenne de surface des vêtements ( $T_{vet}$ ) la température moyenne de la peau ( $T_p$ ) et la température interne ( $T_{cr}$ ) ont été déterminées grâce à deux équations qui ont permis de décrire le flux de chaleur de l'intérieur du corps vers la surface de la peau et de la peau vers la couche de vêtements.

Les hypothèses suivantes ont été faites pour le climat intérieur de référence :

- la température radiante moyenne est égale à la température de l'air, ( $T_{mrt} = T_a$ ),
- la vitesse de l'air est fixée à 0,1 m/s
- la pression de vapeur d'eau est fixée au 12 hPa (approximativement équivalente à une humidité relative de 50% à  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ).

Dans le cas d'une journée d'été, chaude et ensoleillée, la valeur du PET peut valoir 43°C. Cela signifie qu'un individu dans une pièce avec une température d'air de 43°C atteint le même état thermique que dans les mêmes conditions en extérieur. S'il avait à se déplacer à l'ombre le PET diminuerait de 14°C pour atteindre une valeur de 29°C.

	$T_{air}$ (°C)	$T_{mrt}$ (°C)	U (m/s)	P (hPa)	PET (°C)
Pièce typique	21	21	0,1	12	21
Hiver, au soleil	-5	40	0,5	2	10
Hiver, à l'ombre	-5	-5	5,0	2	-13
Été, au soleil	30	60	1,0	21	43
Été, à l'ombre	30	30	1,0	21	29

Tableau III.8 : Exemples de valeurs de l'indice PET pour différents scénarios.  
Source Matzarakis and Mayer, 1996 cité par Vinet, 2000

Fanger (1972) a rapporté les domaines de *PMV* pour la perception thermique des êtres humains correspondants aux domaines de l'indice *PET*.

<i>PMV</i>	<i>PET</i> (°C)	Perception thermique	Degré de la contrainte physiologique
-3,5	4	très froid	froid extrême
		froid	très froid
-2,5	8	froid	froid modéré
-1,5	13	légèrement frais	léger froid
-0,5	18	confortable	pas de contrainte
0,5	23	légèrement chaud	un peu chaud
1,5	29	chaud	chaud modéré
2,5	35	chaud forte	chaleur
3,5	41	très chaud	chaleur extrême

Tableau III.9 : domaine de l'indice de confort thermique PET pour différentes catégories de la perception thermique des êtres humains.  
Production de chaleur interne : 80w, résistance de transfert thermique de vêtements : 0.9 clo Source Matzarkis et al, 1999

#### II.2.5.2.6 L'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature):

L'objectif de cet indice est l'estimation de la contrainte thermique de l'ambiance en évaluant l'effet moyen de la chaleur de son organisme. Il sert au dépistage des situations à risque pour qu'en suite une analyse plus approfondie de la situation soit entreprise [Boutebba S.D, 2007]

L'indice de température mouillée et de globe noir(WBGT) s'écrit, d'après la norme ISO 7243, 1989 cité par Moran D.S et al, 2003, Boutebba S.D, 2007 :

- A l'intérieur des bâtiments ou à l'extérieur sans charge solaire :  

$$WBGT=0.7T_{hn}+0.3T_g \qquad \qquad \qquad Eq (III.23)$$
- A l'extérieur des bâtiments avec charge solaire :

$$WBGT=0.7T_{hn}+0.2T_g+0.1T_a \quad Eq (III.24)$$

Avec :

$T_{hn}$  : température mouillée humide (naturelle).

$T_g$  : température du globe noir.

$T_a$  : température sèche de l'air.

Cette norme permet d'évaluer le niveau de contrainte thermique causée par l'environnement, fixe les valeurs limites du WBGT et donne des valeurs repères pour un travail continu de 4h. Ces valeurs dépassées, une intervention sur l'environnement pour réduire la contrainte thermique, diminution de l'activité ou prévoir un repos est requise.

Classe	Gamme du métabolisme		Valeur repère du WBGT (°C)			
	(W/m <sup>2</sup> )	(W) S. cutanée de 1.8 m <sup>2</sup>	Personne acclimatée à la chaleur		Personne non acclimatée à la chaleur	
0 (repos)	≤ 65	117	33		32.5	
1 (faible)	66 à 130	118 à 234	30		29	
2 (modéré)	131 à 200	235 à 360	27.7		25.7	
			Absence de courants d'air	Mouvements de l'air perceptibles	Absence de courants d'air	Mouvements de l'air perceptibles
3 (élevé)	201 à 260	361 à 468	25	26	22	23
4(très élevé)	> 260	> 468	23	25	18	20

Tableau III.10 : valeurs limites du WBGT en fonction du métabolisme (Icl=0.6 clo) Source Norme NFX 35-201, citée par millanvoye M, 2002

#### II.2.5.2.7 L'indice de sudation requise (SWreq):

“ La sudation requise est la sudation qui serait nécessaire pour maintenir en équilibre le bilan thermique du corps humain. Cette sudation n'est pas toujours possible et les limites sont calculées en fonction de l'acclimatement des travailleurs à la chaleur en tenant compte de leur possibilité de sudation moyenne et de perte hydrique maximale admise par jour” [Malchaire J, 1998 cité par Vinet. J, 2000]

Son calcul comporte la détermination de :

L'évaporation requise ( $E_{req}$ ) nécessaire à l'équilibre thermique en faisant recours à la :  $t_a$ ,  $P_a$ ,  $t_r$ ,  $V_a$ ,  $M$  et  $I_{cl}$  ; l'évaporation maximale ( $E_{max}$ ) en fonction des possibilités de

mouillure et de  $P_a$ ; la mouillure cutanée requise ( $W_{req}$ ) est le rapport  $E_{req} / E_{max}$  ; la sudation requise ( $SW_{req}$ ) en fonction de la  $E_{req}$ ,  $W_{req}$  et le rendement évaporatoire ( $r$ ) ; la sudation prédite en fonction du débit sudoral maximal ( $SW_{max}$ ) et la mouillure cutanée maximale ( $W_{max}$ ).

### III. Méthodes d'analyse bioclimatique :

Il s'agit de méthodes pour analyser le climat d'une région en utilisant les données climatiques par le biais de diagrammes bioclimatiques. Ces diagrammes permettent de prédire les zones de confort humain et proposent aussi les moyens d'intervention ; dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent rétablir la zone de satisfaction thermique. Autrement dit, ils offrent des réponses qui peuvent aider les concepteurs dans leurs tâches.

#### III.1 Méthode d'Olgay :

Cette méthode était la 1ère expérience pour systématiser l'adaptation de la conception des bâtiments aux exigences des conditions climatiques.

La méthode est basée sur un diagramme qui met en évidence la zone du confort humain en relation avec la température de l'air ambiant, l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation. [Givoni, 1978]

Trois zones sont définies :

Zone de confort : au centre, zone du froid : nécessite un chauffage passif ou actif et une zone du chaud : l'occultation solaire, la vitesse de l'air ou refroidissement par évaporation.

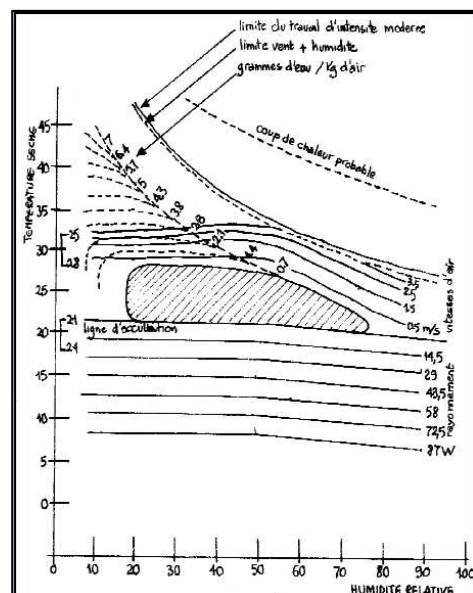


Fig. n° III.6: Diagramme bioclimatique d'olgyay.  
 Source : traduit par Mazouz, 2001 d'après Olgay  
 1973

### III.2 Méthode de Givoni :

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

L'analyse se déroule comme suit :

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

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

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

- Conditions liées aux occupants :

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

- Conditions liées à la protection contre le rayonnement solaire :

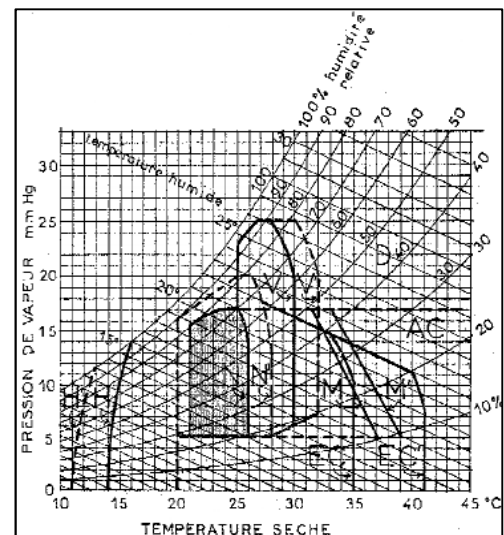
Il est supposé que les apports solaires sont négligeables à travers toute l'enveloppe (L'enveloppe a des protections solaires efficaces), sauf en climat froid, l'énergie solaire peut être signalée.

- Conditions liées aux bâtiments :

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

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

Fig. n° III.7: Diagramme psychométrique de Givoni.  
Source : Givoni, 1978



## IV. Confort hygrothermique :

D'après [Lavigne, 1994], le confort ne dépend pas uniquement du paramètre de la température, mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant.

Le confort hygrométrique représente la 8<sup>ème</sup> cible dans la démarche HQE, sous la notion "ni chaud- ni froid, ni humide- ni sec". Il est défini comme étant la sensation qui se développe chez l'individu par rapport à la température et l'humidité relative ambiante de l'espace où il se trouve. Le confort hygrothermique permet d'atténuer les réactions physiologiques thermorégulatrices (sudation, frissonnements) et les sensations psychologiques de chaud ou de froid [Boulfani w, 2010]

Dans ce contexte il est nécessaire de prendre connaissance de quelques notions fondamentales :

### IV.1 Humidité absolue :

L'humidité absolue "X" est la quantité d'eau, en grammes contenue, sous forme de vapeur invisible dans un volume de 1 mètre cube d'air. Cette même quantité reste limitée ; au delà d'une certaine valeur on voit apparaître du brouillard et de la condensation, l'eau forme alors des microgouttelettes en suspens dans l'air. On dira alors que l'air est saturé.

La valeur de saturation  $V_s$  en  $g/m^3$  est la quantité d'eau maximale que peut contenir l'air sous forme de vapeur invisible avant l'apparition du brouillard, cette valeur est en fonction de la température.

### IV.2 Humidité Relative ou hygrométrie :

L'humidité absolue est insuffisante pour décrire la notion d'humidité et la réaction de la nature et notre environnement à cette présence d'eau, c'est pourquoi la notion de l'humidité relative est définie.

L'humidité relative est le rapport, pour une température donnée, entre la quantité d'eau que contient l'air (humidité absolue) et la quantité maximale qu'il est capable de contenir (valeur de saturation) défini en pourcentage.

$$HR = \frac{\text{Humidité absolue } \left(\frac{g}{m^3}\right)}{\text{valeur de saturation } \left(\frac{g}{m^3}\right)} \cdot 100 \quad Eq (III.1)$$

### IV.3 L'enthalpie spécifique :

L'enthalpie spécifique représente la quantité de chaleur contenue dans l'air humide dont la masse d'air sec est de 1 kg. C'est donc la somme de la chaleur sensible (liée à la



température de l'air) et de la chaleur latente (liée à l'énergie de la vapeur d'eau qu'il contient).

Par convention, on a fixé l'enthalpie de l'air sec à 0°C comme étant zéro. De l'air à - 10°C peut donc avoir une enthalpie négative.

Le symbole représentatif est généralement h. Il s'exprime en kJ/kg<sub>air sec</sub>.

h = enthalpie de l'air sec + enthalpie de la vapeur, soit approximativement :

$$h = 1,006 \cdot T + X \cdot (2\,501 + 1,83 \cdot T) \quad (\text{kJ/kg}_{\text{air sec}}) \quad \text{Eq (III.2)}$$

Où, X est l'humidité absolue et T la température

#### IV.4 La température de rosée :

Est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit. Elle permet d'étudier les problèmes de condensation sur les parois, les tuyauteries, les équipements etc.

#### IV.5 La température humide :

Est la température mesurée à l'aide d'un thermomètre légèrement ventilé et entouré d'un chiffon imbibé d'eau. Elle est toujours inférieure (ou égale) à la température T de l'air, car l'évaporation de l'eau imbibant le chiffon provoque un refroidissement du bulbe du thermomètre.

Sa mesure était autrefois le moyen d'évaluer l'humidité des ambiances. On rencontre encore cette notion dans les documentations techniques de certains équipements (tours de refroidissements, climatiseurs, ventilo-convecteurs etc.).

#### IV.6 Diagramme de l'air humide :

Le diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique permet de visualiser un ensemble de caractéristiques de l'air en rapport avec sa température et son humidité. Ces caractéristiques sont celles que l'on rencontre couramment dans les problèmes de confort humain et de climatisation.

- La température de l'air, notée (t) est indiquée sur l'axe horizontal (abscisse) gradué, en [°C].
- L'axe vertical (ordonnées) indique la teneur en humidité de l'air, notée (r) et exprimée en [g<sub>vapeur</sub>/Kg<sub>air sec</sub>]
- La saturation de l'air en vapeur correspond à la courbe limitant le graphe à gauche (quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir).

- Les courbes en bleu (voir fig. n°III.2) représentent les degrés d'humidité (humidité relative).
- Sur le diagramme de l'air humide, la température de rosée d'une ambiance correspond à l'intersection entre l'horizontale du point d'ambiance et la courbe de saturation.

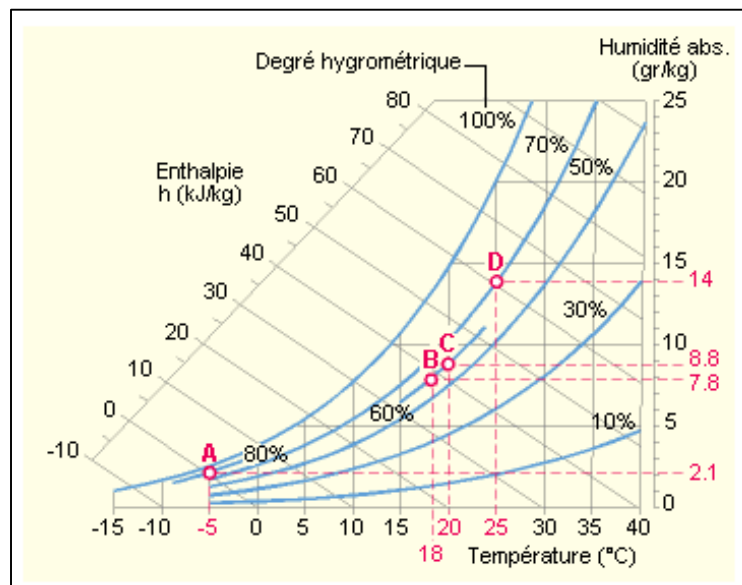


Fig. n°III.8: Diagramme de l'air humide -  
Source Energie+,2012

Il est souvent plus rapide de consulter les abaques ou le diagramme de l'air humide mais il existe bien sûr des formules et équations mathématiques de relation entre ces différentes grandeurs de l'hygrométrie.

## V. Bâtiment/ occupant et confort thermique :

Une des caractéristiques principales du confort thermique est donc sa pluridisciplinarité, faisant intervenir un nombre d'éléments de nature différente. Parler de seuls les aspects physiques (les échanges de chaleur) et physiologiques (la thermorégulation), réduit l'importance du confort thermique et ne permet pas de représenter les différents états du confort de l'individu dans le bâtiment [Moujalled. B, 2007]. Le troisième aspect de l'approche analytique, qui est l'aspect adaptatif, reste encore comme une boîte noire et repose sur beaucoup de subjectivité.

L'application de la systémique dans le domaine du bâtiment, permet d'apporter une vision globale sur le bâtiment considéré comme un système doté d'une structure assurant des fonctions et se transformant dans le temps identifiée par ses finalités et perçue dans un environnement actif [ le Moigne, 1999 cité par Moujalled. B, 2007] et facilite ainsi la prise en compte des interactions entre les différents aspects ; architectural, environnemental, économique sur une échelle locale et globale.

La définition du système bâtiment, consiste ainsi à identifier sa frontière à travers laquelle il échange matière énergie ou information avec son environnement par rapport à la finalité de procurer un environnement intérieur favorable aux activités des occupants.

Ainsi, la frontière est l'enveloppe du système bâtiment qui réalise sa clôture, celui-ci étant en interaction avec un environnement extérieur et un environnement intérieur, l'occupant.

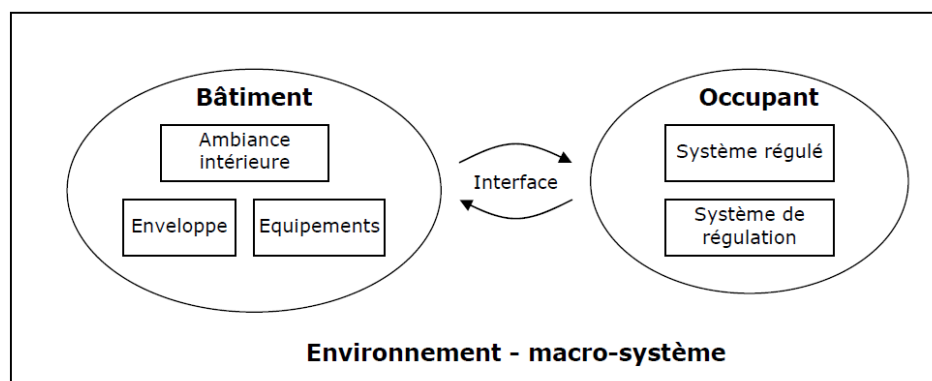


Fig. n° III.9: Représentation du système occupant-bâtiment.  
Source : Moujalled. B, 2007

L'approche systémique est beaucoup plus complexe que cette simple définition, mais selon les objectifs de notre recherche, nous nous limiterons à deux considérations principales : le bâtiment peut être considéré comme un système qui a pour rôle d'assurer le bien-être de ses occupants. Son enveloppe constitue la frontière qui pourrait influencer le confort des individus à l'intérieur des bâtiments. Ainsi, les conditions climatiques externes, déterminent une grande partie des températures atteignant les parois et par conséquent les températures intérieures.

## **Conclusion :**

Comme nous l'avons vu, le confort thermique est une sensation complexe produite par de nombreux facteurs. Mais il est aussi une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents et réagissent différemment. Il est généralement traité à travers le calcul du bilan thermique du corps humain, ce calcul nous permet de prédire le niveau du confort à travers des indices dont nous avons exposé quelques uns dans l'actuel chapitre.

La température, l'humidité et la vitesse de l'air sont les principaux paramètres environnementaux qui déterminent l'estimation des situations de confort. D'autres paramètres liés aux individus, occupants de l'espace interviennent aussi dans de nombreux échanges thermiques.

Aussi, dans ce troisième chapitre, le bâtiment était présenté comme un système qui a pour but d'assurer le confort de ses occupants. Son enveloppe constitue la frontière de ce système " Bâtiment", c'est par elle que s'opère l'échange de matière, énergie, ou information avec son environnement par rapport à la finalité de procurer un environnement intérieur favorable aux activités des occupants [Moujalled. B, 2007].

Elle réalise ainsi la clôture du système bâtiment qui est en interaction avec un environnement extérieur (l'urbain) et l'environnement intérieur (l'occupant).

Cette considération nous a mené à aborder le confort thermique selon les échanges qui s'opèrent entre le bâtiment et son occupant. Nous avons aussi présenté quelques indices de stress thermique ou l'absence de confort, l'impact direct du microclimat constitue la principale cause de ces situations de désagrément.

# **CHAPITRE IV:**

**INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS SUR LA  
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS**



Fig. n°IV.1 : Fontaine Citroën et son système hydraulique. Source : Timpe. A, 2011

*“ Si l’îlot de chaleur urbain se caractérise par une hausse globale des températures, on sait qu’il fait meilleur sous les platanes ou au bord d’un fleuve. En effet, il n’y a pas un climat d’une ville mais en fait une mosaïque de microclimat..... D’une rue, à l’autre, à l’ombre d’un immeuble, dans un parc public, le temps change. A ce stade, les études se font à l’échelle d’un quartier, de quelques rues, voire d’un immeuble. Le but est de comprendre comment fonctionne la zone et d’en déduire l’impact d’un aménagement”*

Kergomard. C, *A chaque ville son microclimat*

## **Introduction**

Les architectes, urbanistes et ingénieurs sont fortement sollicités pour élaborer des méthodes de conception permettant de limiter l'impact environnemental de l'urbanisation et de concilier les exigences de l'homme avec son environnement. De nombreux travaux montrent que des phénomènes climatiques comme l'îlot de chaleur urbain sont à la fois les causes et les conséquences de l'augmentation de la consommation énergétique à l'échelle de la ville. Température, humidité relative, vent, précipitation et rayonnement solaire sont les principaux paramètres climatiques à prendre en considération.

Par ailleurs, l'expertise énergétique des bâtiments est possible avec des outils opérationnels qui ne prennent pas correctement en compte les conditions climatiques à petite échelle spatiale alors qu'il est démontré que leurs effets sont avérés. Souvent négligé, l'impact direct et indirect de l'aménagement constitue pourtant une piste intéressante pour la régulation énergétique passive. Dans le présent chapitre nous exposerons un ensemble d'études, recherches mais surtout résultats qui nous permettront de démontrer l'interaction entre microclimat, aménagement extérieur et consommation énergétique.

## I. L'échelle climatique étudiée :

La classification des échelles urbaine repose sur un grand nombre de considérations météorologiques et géographiques. La différenciation de chacune d'elles passe par l'observation des phénomènes en fonction des échelles temporelles et spatiales [Bouyer. J, 2009] Chaque échelle spatiale implique des interactions atmosphériques et climatiques propres.

L'échelle de notre étude est l'échelle microclimatique qui correspond à une échelle spatiale horizontale où la dimension transversale des fragments étudiés ne dépasse pas les 300 mètres, et une échelle verticale correspondant à la sous-couche de rugosité. L'échelle temporelle type d'étude des phénomènes physiques est l'échelle horaire. "A ce niveau, chaque mur, chaque toit, chaque chaussée, chaque cour, chaque rue, chaque parc peut créer une zone microclimatique avec laquelle il interagit. Des variations des paramètres climatiques comme les températures et l'humidité de l'air peuvent être relevées" [Boussoulim. A, 2002] A cette échelle climatique, l'homme peut intervenir pour atténuer les conséquences climatiques (haie, brise-vent, urbanisme adapté aux vents dominants, à l'ensoleillement, à la présence d'eau). [Vinet J, 2000]

Parmi les microclimats, nous distinguons les microclimats de l'intérieur des bâtiments de ceux de l'extérieur. Dans ce travail, nous nous étudierons l'influence de ces derniers, sur le microclimat intérieur des bâtiments.

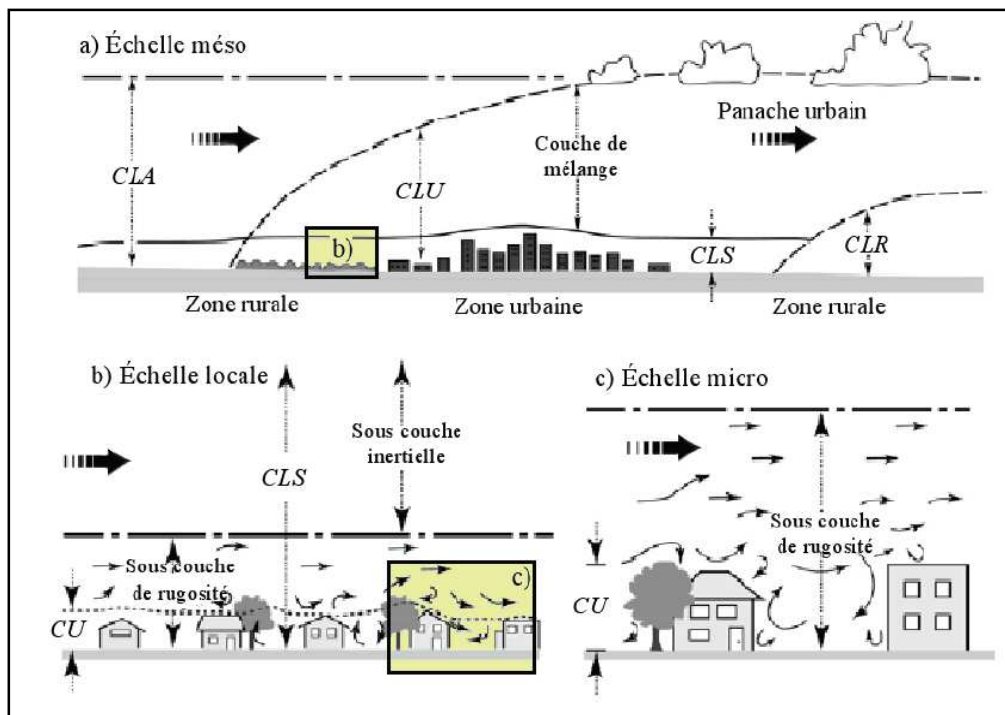


Fig. n°IV.2: l'échelle climatique étudiée : Oke, 2006 adapté par Bouyer J, 2009



## II. Influence de l'aménagement extérieur sur le microclimat urbain :

### II.1 Le phénomène de L'îlot de chaleur urbain :

Les recherches sur l'îlot de chaleur urbain arrivent à une époque où le grand public se sent concerné par les conditions environnementales locales et globales. Pollution de l'air, de l'eau et possibilité de changement global du climat nous imposent de diminuer nos consommations énergétiques. Plusieurs études ont certifié l'existence d'une différence de température systématique entre l'air atmosphérique des villes et celui des zones rurales ou périphériques suburbains moins densifiées. Ainsi une définition physique de l'îlot de chaleur urbain (ICU) comme étant ; l'écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante  $\Delta T_{u-r}$  (max), les indices u et r respectivement pour urbain et rural [Oke, 1987 cité par Vinet. J, 2000]. Cette dénomination vient du fait que la représentation de l'évolution spatiale de la température révèle un pic de température semblable à un îlot au niveau des agglomérations de plus le pic est constaté tant au niveau des températures de surface que la température d'air. [Bouyer J, 2009]

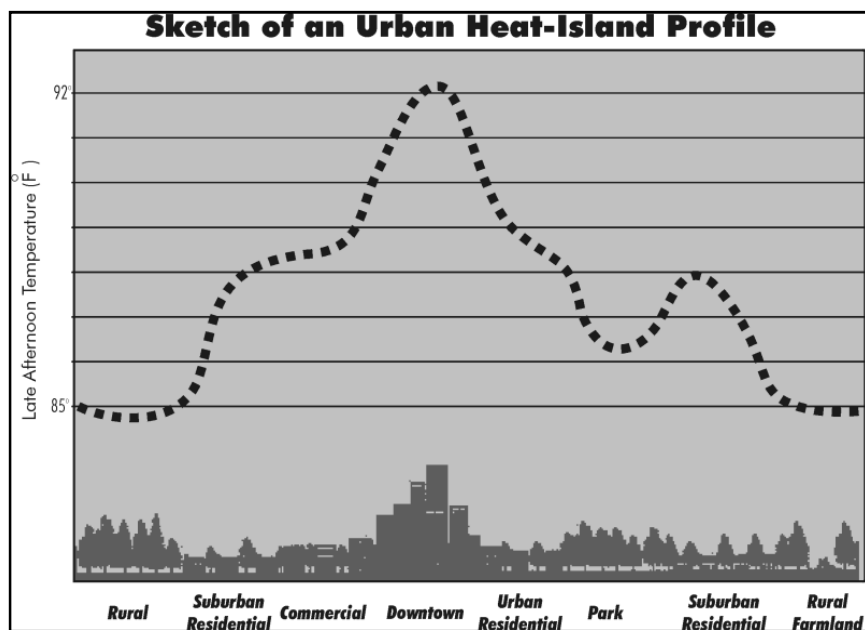


Fig. n°IV.3 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain  
source : Akbari et al, 1992

Les processus physiques ayant une action sur la génération de l'ICU sont les suivants [Oke 1987, Mestayer et al 1994, CSTB 1995 cités par Vinet. J, 2000] :

- Accumulation de la chaleur dans les bâtiments : importante inertie thermique qui implique le stockage de toute forme d'apport de chaleur.

- Altération du bilan d'eau : diminution des surfaces évaporatives remplacées par des surfaces minérales et altération simultanée de la balance hydrique à cause de la réduction de l'évapotranspiration de la végétation.
- Altération du bilan radiatif : la moindre visibilité du ciel des surfaces bâties qui contribuent à faire décroître leur échange de rayonnement de grande longueur et l'absorption accrue du rayonnement de courte longueur d'onde due au piégeage des rayons solaires par multi-réflexions au sein des surfaces urbaines très accidentées
- Altération du cycle diurne des flux de chaleur sensible par rayonnement et par conduction notamment lors du refroidissement nocturne.
- Production de chaleur sensible anthropogénique provenant des transports, équipements électriques des bâtiments, industrie...etc.
- Réduction de la vitesse du vent à cause de la présence des bâtiments et qui entraîne une réduction des transferts de chaleur turbulents et l'évacuation de la chaleur stockée dans les rues.
- Topographie locale et écoulements aérauliques locaux.

Cependant l'écart de température dû à l'urbanisation reste difficilement quantifiable. *“Ceci est dû au fait que les centres urbains se sont développés en fonction de configurations naturelles particulières comme par exemple des cours d'eau pour le transport et qui ont disparus au fil du temps et donc des conditions climatiques singulières”* [Benzerzour. M, 2004]

L'intensité de l'îlot de chaleur varie en fonction de la taille de la ville, la densité d'habitants, la densité des constructions et des paramètres descriptifs de la morphologie urbaine (organisation et hauteur).

## **II.2 Morphologie urbaine :**

La morphologie urbaine se définit généralement comme l'association de la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments, de son étalement et de la volumétrie des espaces extérieurs qu'ils créent [Nikolopoulou, 2004 cité par Bouyer. J, 2009]

Cependant, il n'existe pas de catégories reconnues de la morphologie à l'échelle urbaine. On parle de trame urbaine, de plan de masse, de système de parcellaire, mais il n'est pas encore possible (à l'exception de quelques tentatives telles que celles d'Oke, 2006) de distinguer les formes en fonction de leurs effets climatiques à l'échelle locale.

Oke, 2006 a établi une classification qui associe les effets climatiques à l'échelle locale et une description sommaire de la zone en fonction de trois données du terrain :

- La classe de rugosité.
- Le rapport d'aspect moyen des rues canyons qui a un effet direct sur le régime des flux et des échanges thermiques et radiatifs.
- La fraction de la surface bâtie : proportion de surface couverte par éléments construits (bâtiments, rues, pavages...) à celle couverte par des éléments perméables (espaces verts, eau et autres). La perméabilité a un effet sur l'humidité de l'air et sur le potentiel d'humidification et d'évaporation provenant du sol.

Zone climatiques urbaines	Image	Classe de rugosité	Rapport d'aspect du canyon	% construit (imperméable)
Croissance urbaine intense avec des variations importantes des hauteurs de bâtiments (présence de tours)		8	>2	>90
Croissance intense à forte densité avec hauteurs homogènes et bâtiments proches (Utilisation de la brique et de la pierre)		7	1.0-2.5	>85
Croissance importante, densité moyenne, Bâtiments espacés (habitations urbaines...)		7	0.5-1.5	70-85
Croissance importante, densité moyenne, bâtiments bas, sols pavé (centres commerciaux...)		5	0.05-0.2	70-95
Croissance moyenne, densité faible avec 01 à 02 rangées de maisons (périphérie urbaine)		6	0.2-0.6 (plus de 1 avec arbres)	35-65
Paysage ouvert, succession d'espaces verts et de bâtiments étendus, usages divers (aéroports, universités...)		5	0.1-0.5 dépend des arbres	<40
Site semi-rural avec des habitations éparpillées sur un sol agricole (fermes...)		4	>0.05 dépend des arbres	<10

	Bâtiments		Arbres		Sol imperméable		Sol perméable
--	-----------	--	--------	--	-----------------	--	---------------

Catégorie rugosité	Z0 (m)	Description du paysage correspondant
4 Rugueux ouvert	0.10	Territoire modérément ouvert avec des obstacles occasionnels (bâtiments bas isolés ou arbres) avec une distance entre obstacles égale à 20 fois leur hauteur
5 Rugueux	0.25	Obstacles réguliers avec des distances égales entre 8 à 12 fois leur hauteur pour des objets assez bas (exp. Bâtiments) (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
6 Très rugueux	0.5	Surface modérément couverte par des bâtiments bas séparés par une distance égale entre 3 à 7 fois le leur hauteur et sans arbres hauts (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
7 Rugueux régulier	1.0	Surface bâtie dense sans grande variation de hauteur (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
8. Chaotique	2.0	Centres villes composés de bâtiments avec une forte variation de hauteur

Fig. n°IV.4 : Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local. Source : Oke, 2006 adapté par Bouyer. J, 2009

### II.2.1 Le piégeage radiatif:

Un des phénomènes les plus remarquables en site urbain est le piégeage radiatif. Celui-ci consiste en l'absorption progressive des flux radiatifs issus des multi réflexions sur les parois des bâtiments et sur les sols qui ne sont pas systématiquement redirigés vers le ciel.

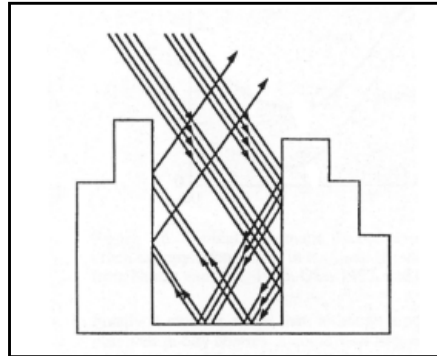


Fig. n°IV.5: Le phénomène de piégeage radiatif d'après Estournel. Source Bouyer. J, 2009

### II.2.2 Les effets aérodynamiques:

A l'échelle microclimatique urbaine, le vent est fortement perturbé par la configuration du bâti et ses directions sont fortement influencées par l'orientation des rues et des divers obstacles bâtis.

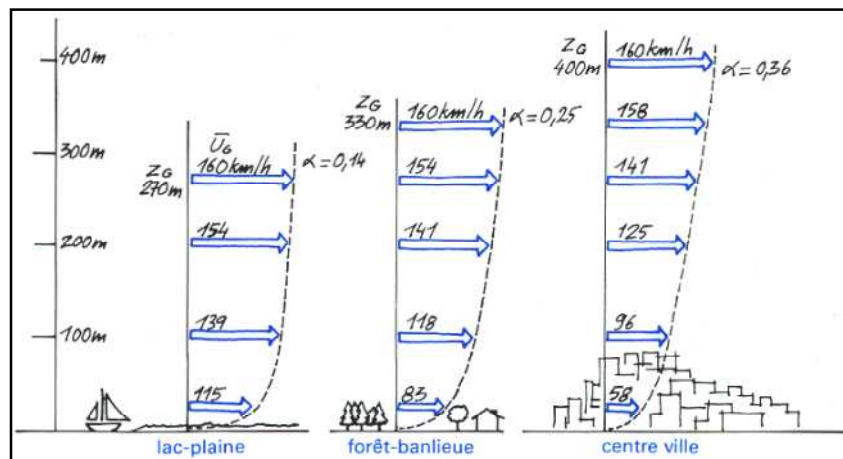


Fig. n°IV.6 : Profils verticaux de vitesses de vent, en fonction puissance, au dessus de 3 terrains de rugosités différentes. Source : Gandemer et Guyot, 1976 cité par Bouyer. J, 2009

Des effets aérodynamiques liés à des configurations type des bâtiments sont souvent introduits, leur description découle principalement d'étude en soufflerie. Quelques exemples sont présentés dans la figure IV.6

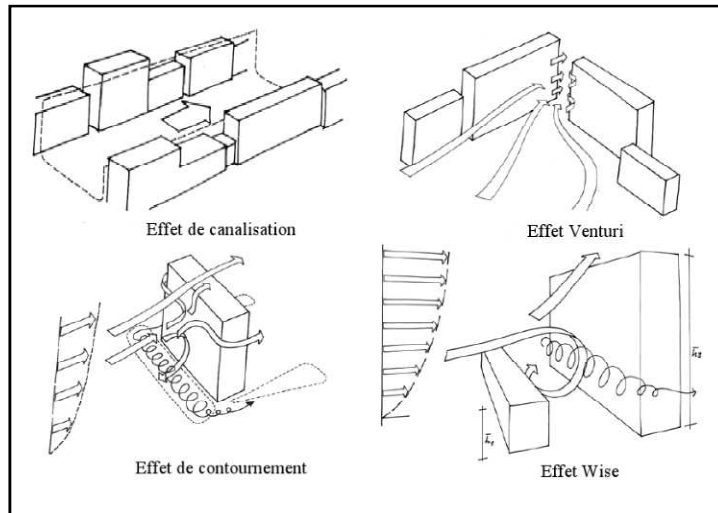


Fig. n°IV.7 : Effets aérodynamiques types. Source [Gandemer et Guyot, 1976 cité par Vinet, J, 2009]

### II.3 Les matériaux :

Il s'agit de ceux qui constituent les revêtements des sols, façades et éléments du mobilier urbain. Ces matériaux modifient de manière directe les températures de surface de la ville et indirectement les températures d'air, et par conséquent contribuent à la modification de l'ICU.

Pour certains chercheurs, le rôle des propriétés des surfaces en insistant préférentiellement sur la réflectivité solaire puis l'émissivité passe au premier rang. Tandis que pour d'autres, l'impact des matériaux réside en grande partie dans la chaleur spécifique (ou capacité thermique), la diffusivité thermique et l'inertie.

Les matériaux qui constituent l'enveloppe des bâtiments constituent un filtre aux conditions climatiques extérieures, déterminant le confort intérieur. Mais aussi du fait de leur réflectivité et transmissivité solaire, ils influencent aussi les conditions de confort visuel thermiques des espaces adjacents. Les matériaux exposés aux rayonnements solaires directs, stockent une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur qui est libérée en différé après un temps qui dépend de la capacité de stockage du matériau.



Fig. n°IV.8: Photo et thermographies IRT des revêtements testés dans l'étude de Doulos et al, 2004, source : Bouyer, J.2009.

## II.4 Arbres et aménagements végétaux :

Outre la fonction esthétique et la dimension sociale et psychologique, l'utilisation des arbres permet de modifier le climat local et améliorer les conditions de confort.

Les arbres agissent :

Individuellement, comme des masques solaires et brise vent qui modifient les champs de rayonnement et écoulements d'air autour des bâtiments

Un groupe d'arbre ou zone végétale permet la réduction de la température de l'air urbain par l'absorption du rayonnement solaire. Ce dernier est transformé en énergie chimique pour la photosynthèse et pour sa grande partie dissipé en chaleur latente (évapotranspiration).

Les feuillages constituent aussi des absorbeurs de bruit et les racines contribuent à la stabilisation du sol.

Cependant un espace planté ne se conçoit pas arbitrairement, il faut prendre compte le type d'espèce (sa morphologie : taille, forme, diamètre ainsi que sa durée de foliation), le type de croissance (le temps nécessaire pour atteindre une taille qui permet d'apporter à la fois l'ombre et les avantages du refroidissement) et l'emplacement.

L'aptitude des végétaux à modifier le climat réside principalement dans le phénomène de l'évapotranspiration. Un arbre peut être considéré comme un climatiseur naturel épuisant jusqu'à  $0.378 \text{ m}^3/\text{jour}$  dans de bonnes conditions d'irrigation, soit un potentiel de refroidissement égal à  $26,7 \text{ kWh/jour}$  [Saxena, 2002 cité par Bouyer. J , 2006].

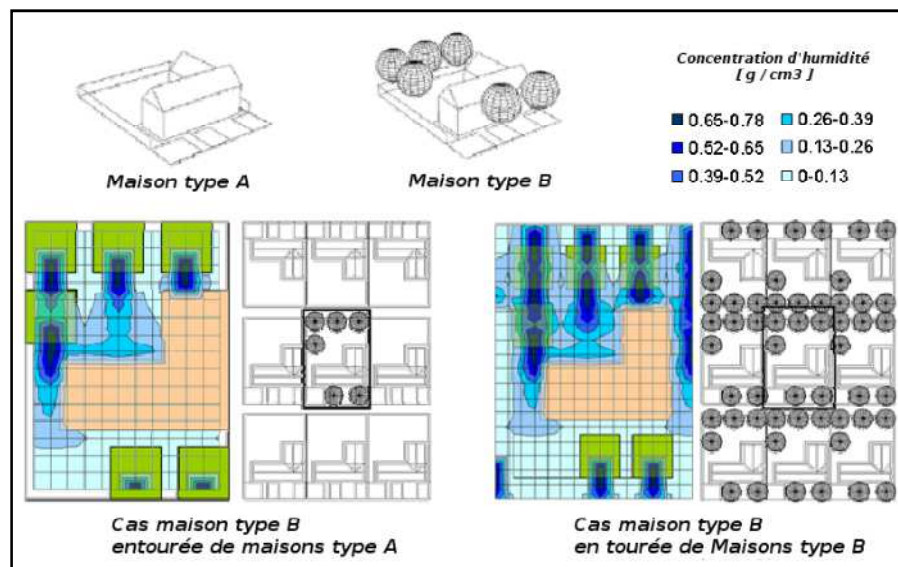


Fig. n°IV.9: Influence des arbres sur l'humidité et la température de l'air dans des quartiers résidentiels, source : adapté de Saxena, 2002 par Bouyer, J , 2009

## II.5 L'eau :

Les étangs et fontaines peuvent être des dispositifs de climatisation très efficaces dans les espaces ouverts en raison de la capacité de l'eau à garder sa température inférieure à celle de l'air ambiant, ainsi que sa faible réflectivité. Les étangs ont une réflectivité de 3% en temps de rayonnement solaire maximum, ils reflètent ainsi peu ou presque pas de rayonnement vers les zones occupées.

Selon la profondeur du plan d'eau, l'absorption du rayonnement peut atteindre 80%, mais même ce taux élevé ne produit pas d'augmentation considérable de la température de l'eau en raison de son inertie thermique.

Quand cette surface est ombragée, le rayonnement solaire entrant est réduit et par conséquent une réduction de la température de l'eau est observée.

### *Synthèse :*

Dans cette première partie, nous avons abordé notre échelle d'étude qui est l'échelle microclimatique. Cette échelle correspond horizontalement à la dimension transversale des fragments étudiés ne dépassant les 300m et une échelle verticale correspondant à la sous-couche de rugosité, avec une échelle temporelle horaire.

Les composantes de cette canopée sont diverses et ont une influence directe et indirecte sur le microclimat observé à ce niveau : le vent à cette échelle est fortement perturbé par la configuration du bâti et ses directions sont fortement influencées par l'orientation des rues et diverses obstacles bâtis, ainsi que la présence d'arbres et plantations.

La présence de l'eau, des zones vertes ainsi que le type de matériaux choisis pour l'enveloppe des bâtiments et revêtement des sols ; modifient de manière directe les températures de surface des villes et la température de l'air.

Cette présentation nous a permis de comprendre que les dispositifs d'eau peuvent apporter une amélioration des conditions climatiques à cette échelle. Cela est principalement possible grâce à son inertie thermique qui lui permet de garder sa température inférieure à celle de l'air ambiant, ainsi que sa faible réflectivité. Cependant une combinaison entre ces dispositifs et une présence végétale l'amélioration est notamment plus considérable.

### III. L'influence du microclimat urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment :

Dans ce qui suit nous dressons un panorama, des constats sur l'impact des phénomènes et des variables microclimatiques sur les consommations énergétiques associées au confort hygrothermique à l'intérieur des bâtiments :

#### III.1 La température de l'air :

Le phénomène de l'Îlot de chaleur urbain (ICU), modifie les charges climatiques sollicitant les bâtiments et module ainsi les consommations énergie visant à rétablir les conditions de confort à l'intérieur de ceux-ci.

Des études de comparaisons entre l'évolution des températures d'air extérieur et celles des consommations d'énergie domestiques résidentiels à los angles, ont mis en évidence une corrélation entre ces deux grandeurs [Akbari e al, 1992, cité par Bouyer, 2009]. Une puissance électrique de climatisation augmente de près de 540 MW par écart de degré de la température ambiante, de ce fait on estime que 3% à 8% de la demande d'électricité est utilisée pour compenser uniquement cet effet. Un autre exemple est celui de la ville d'Athènes qui a fait objet de plusieurs études pour son ICU, dû à une pollution importante [Hassid, 2000, cité par Boussoulim. A, 2002], des relevés pour un bâtiment de référence ont montrés que les charges thermiques pouvaient être doublées.

Ainsi l'augmentation des températures entraine des charges climatiques instantanées dans les bâtiments plus importantes et par conséquent une amplification de l'utilisation des équipements climatiques.

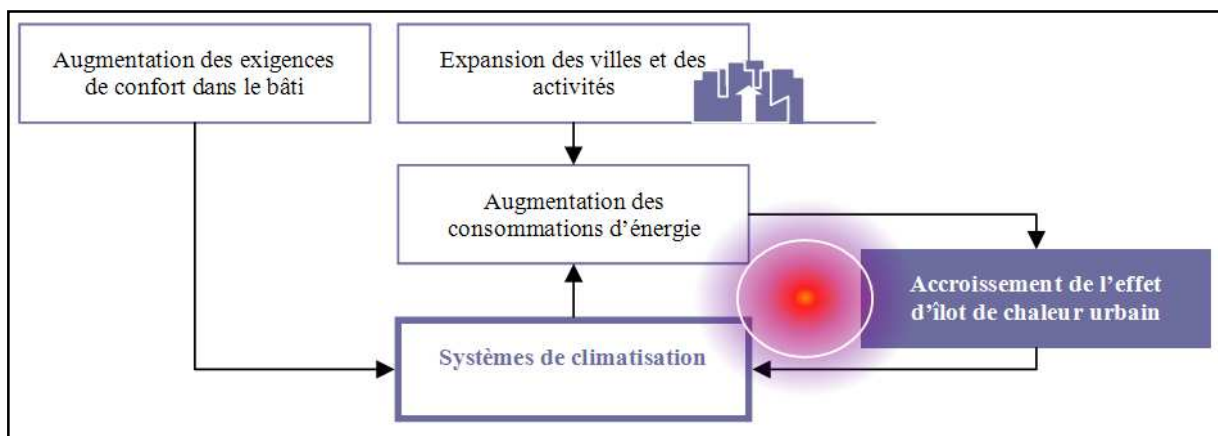


Fig. n°IV.10 : Accroissement de l'îlot de chaleur urbain par la puissance dissipée des systèmes de génie climatique source : Bozonnet. E, 2005



### **III.2 Les flux solaires :**

Le potentiel énergétique d'un ensemble de bâtiments peut être évalué par les quantités d'énergie solaire atteignant les surfaces de l'enveloppe de ces mêmes bâtiments [Bouyer J, 2009]. Les apports solaires sont directs ou diffus, mais aussi sont dû aux réflexions s'opérant dans l'environnement proche du bâtiment en fonction des propriétés réfléchives des façades vues. Les éléments déterminants pour la diminution des charges de climatisation pour le bâtiment sont alors le taux de protection solaire, le ratio de surface et la quantité photométrique de ses vitrages et sa compacité.

### **III.3 L'influence du vent :**

L'influence du vent est associée aux échanges convectifs à la surface extérieure du bâtiment et au flux thermique généré par le renouvellement d'air des espaces intérieurs. Les variables climatiques les plus importantes liées aux conditions de vent sont la vitesse d'air et le coefficient de convection [Vinet J, 2000]

Les champs de pression influencent le potentiel de ventilation naturelle à l'intérieur des bâtiments, tandis que les flux convectifs ont une part importante dans la charge et la décharge d'énergie dans les parois des bâtiments. De plus les courants d'air à l'échelle du quartier sont les vecteurs du transport d'énergie (masses d'air chauffées ou refroidies un peu plus loin) d'évacuation ou d'apport de polluants.

## **IV. L'influence des aménagements extérieurs sur les consommations énergétiques du bâtiment :**

L'influence des aménagements extérieurs concerne directement l'impact éventuel des arbres, parcs, eaux, matériaux sur le comportement énergétique du bâtiment.

### **IV.1 Les arbres :**

Les plantations sont parmi les techniques passives les plus utilisées à l'échelle urbaine, elles ont un effet bénéfique direct sur la consommation énergétique des bâtiments par l'écran qu'elles constituent au rayonnement solaire et au vent quand elles sont placées devant. Lorsque la couverture végétale est discontinue ou présente des différences de hauteur (ou rugosité) ou lorsque l'évapotranspiration réelle varie dans l'espace, le bilan d'énergie peut être modifié localement, ce qui entraîne un changement de tous les facteurs climatiques.

Selon [Boussoulim. A, 2005], une couverture végétale exerce une action considérable sur le climat par le fait de :

- *sa rugosité* qui dépend surtout de la hauteur du végétal considéré.
- *sa capacité à stocker ou à restituer l'eau* : elle est moindre si l'eau y est abondante, par exemple dans le cas d'une pelouse arrosée. La végétation modifie la température dans la mesure où le flux de chaleur sensible (par conduction dans le sol) est plus ou moins important.
- *son pouvoir d'absorption ou de réflexion de la radiation solaire* : le rayonnement incident réfléchi par la partie supérieure du couvert végétal est, en partie, capté par les irrégularités de la surface.

En adaptant la végétation à l'effet recherché (ombrage avec canopée dense, grandes plantes à feuillage peu dense pour la porosité à l'air, isolation thermique on peut déduire l'énergie nécessaire à la climatisation de 15 à 35% [Bozonnet et al ,2006 cité par Bouyer J, 2009]

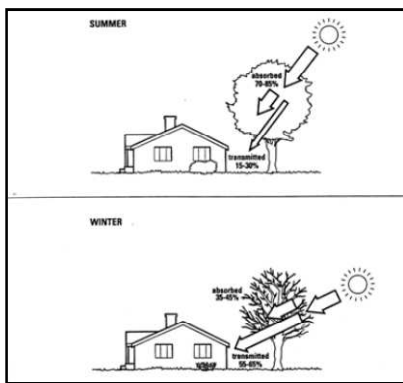


Fig. n°IV.11 : Transmission solaire  
source : Akbari et al. 1992.  
cité par Vinet, 2000

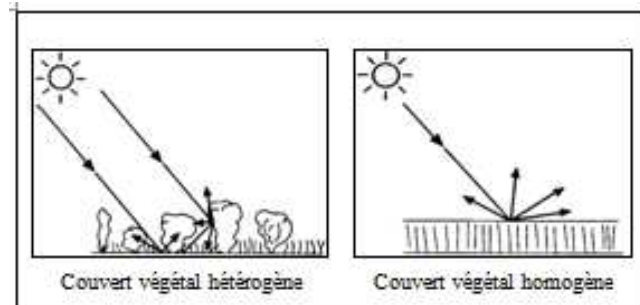


Fig. n°IV.12 : Schématisation de l'effet de «piégeage» de la lumière d'un couvert végétal.  
Source : Guyot G, 1997 cité par Bozonnet, 2005

## IV.2 Les parcs :

D'après [Bouyer J, 2009], une étude de l'influence des parcs sur la consommation énergétiques des bâtiments a été menée par [yu et Hien, 2006] dans la ville de Singapour et qui consistait à :

- Effectuer des mesures météorologiques dans l'environnement urbain à l'intérieur et à l'extérieur de deux parcs (une réserve naturelle Bukit Batok Nature Park (63ha) et le jardin public Clementi Woods Park (12ha)) ainsi que celle des propriétés de densité de végétation à l'échelle des deux parcs.
- Effectuer des simulations des consommations énergétiques d'un bâtiment de référence à proximité de la réserve naturelle sous conditions météorologiques.

- Effectuer des simulations environnementales avec l’outil Envi-met pour comparer 03 environnements urbains hypothétiques, liés à 03 configurations concernant le ‘‘Woods park’’, à savoir : l’existence du parc, avec un vide urbain à la place du parc et avec des bâtiments à la place du parc.

Les auteurs sont arrivés à déterminer que l’on peut réaliser 10% d’économie de climatisation entre un bâtiment dans le parc et un bâtiment de référence situé à 400 m à l’extérieur du parc. De même on peut réaliser 9%, 7% et 4% d’économie entre respectivement ; un bâtiment situé à 100m, 200m et 300m à l’extérieur.

### **IV.3 La présence de l’eau:**

Les bassins, étangs, fontaines et jets d’eau sont les principales formes d’aménagement aquatique en espace urbain. L’eau présente plusieurs particularités. Son inertie thermique est plus grande que celle de l’air et que celle de la terre donc elle se réchauffe et se refroidit plus lentement. Elle est par définition plus « humide » et sa rugosité nulle ou très faible.

Comme nous l’avons déjà vu dans le deuxième chapitre, les effets de fontaines sont très localisés. L’échange entre une fontaine et l’air environnant est faible et donc ne participe que très peu au refroidissement de l’espace urbain ouvert. Seuls des effets psychologiques peuvent être avancés. [étude établie par le groupe ABC, citée par Boussoulim. A, 2002]

Par contre, les jets d’eau ont un effet d’humidification et de refroidissement à proximité. Dans ce cas là, il ne s’agit plus de plan d’eau, mais d’eau projetée vers le haut et retombant en jets. Les effets de réflexion ne se produisent plus et l’émissivité de l’eau joue pleinement.

Cependant, les surfaces d’eau augmentent l’humidité de l’air, elles sont avantageuses dans les climats secs, mais peuvent être source de désagrément dans les climats très humides. *‘‘Dans les climats chaud leur effet de refroidissement devrait être maximisé par la conception de stratégies empêchant la diffusion de l’air refroidi dans toutes les directions mais en les dirigeant vers les espaces habités’’* [Bouyer J, 2009]

### **IV.4 Matériaux et couleurs:**

La couleur des façades d’un bâtiment influe sur ses performances thermiques (à citer les tests menés par Givoni dans les années 70, sur les couleurs particulièrement le blanc et le gris. Des différences de températures ont été mesurées, mais encore plus élevées avec la couleur grise). Mais également l’influence de la couleur varie avec la résistance thermique et la conductivité thermique des murs. Cheng grâce à une expérimentation réalisée à Hong

Kong en 2005, affirme que la couleur de la façade n'influe sur la température intérieure que si sa résistance thermique est faible.

En utilisant des matériaux froids en milieu urbain, on contribue à abaisser les températures de surface qui affectent les échanges thermiques avec l'air, à améliorer le confort extérieur et diminuer la température ambiante.

Ainsi chaque élément des quatre cités ci-dessus, présente des caractéristiques qui lui sont propres : une conduction, une absorption, un albédo et une inertie thermique. Ces caractéristiques influencent fortement les échanges thermiques et énergétiques entre les surfaces et donc la nature des surfaces joue un rôle considérable dans la modification des facteurs climatiques.

Le tableau suivant (Guyot G., 1997) montre que les propriétés optiques des surfaces naturelles peuvent être différentes selon le domaine spectral considéré. Ainsi, l'albédo des sols varie dans d'assez larges proportions en fonction de leur humidité de surface, alors que leur émissivité est peu affectée. L'albédo de la végétation est relativement faible mais peut pratiquement varier du simple au double, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur son bilan d'énergie. [Boussoualim. A, 2002]

Type de surface	Autres caractéristiques	Albédo	Emissivité
<b>Eau</b>	Faible angle zénithal	0.03 – 0.01	0.92 – 0.97
	Fort angle zénithal	0.10 – 0.50	0.92 – 0.97
<b>Sable nu</b>	Sec	0.35 – 0.45	0.84 – 0.90
	Humide	0.20 – 0.30	0.91 – 0.95
<b>Sol nu</b>	Argileux sec	0.20 – 0.35	0.95
	Argileux humide	0.10 – 0.20	0.97
<b>Surfaces artificielles</b>	Béton	1.17 – 0.27	0.71 – 0.88
	Route goudronnée	0.05 – 0.10	0.55 – 0.95
<b>Surfaces agricoles</b>	Prairies	0.16 – 0.26	0.90 – 0.95
	Cultures : blé, riz, ...etc.	0.10 – 0.25	0.90 – 0.99
	Vergers	0.15 – 0.20	0.90 – 0.95
<b>Forêts</b>	A feuilles caduques	0.10 – 0.20	0.97 – 0.98
	Conifères	0.05 – 0.15	0.97 – 0.99

Tableau IV.1 : Propriétés radiométriques de quelques surfaces naturelles source Guyot G, cité par Boussoualim. A, 2002.

### *Synthèse :*

Réduire les consommations énergétiques dépend d'un ensemble de facteurs climatiques et autres. La température de l'air ainsi que le vent (coefficient de conduction) peuvent entraîner des charges climatiques instantanées importantes dans les bâtiments et par conséquent une amplification de l'utilisation des équipements climatiques. Cet effet peut être minimisé, comme nous l'avons vu dans la première partie, par un choix judicieux dès les premières phases de planification et conception. Les dispositifs et aménagements urbains, participent aussi à l'amélioration des conditions climatiques et l'économie d'énergie, cette amélioration a été démontrée par différentes études. L'eau et la végétation sont des techniques passives, faciles à utiliser et qui ont donné leur preuve quant à la réduction des consommations énergétiques.

## **V. Les études effectuées sur le rôle microclimatique de l'eau :**

### **V.1 Installations d'eau pour la création d'un microclimat urbain confortable [Nishimura N et al, 1998]:**

#### **V.1.1 Description et objectif de l'étude :**

Cette étude est considérée comme une des rares, entreprises dans ce domaine, l'objectif principal était de tirer l'attention sur les effets de refroidissement des installations hydrauliques : fontaines, chutes d'eau et canaux urbains ; particulièrement en période estivales. Le site choisi est le parc Tennōji à Osaka, Japon.

#### **V.1.2 Méthode adoptée :**

Nishimura et al <sup>1</sup> ont proposé l'utilisation d'installations artificielles d'eau : bassin d'eau, une cascade (avec une hauteur moyenne de 2m) et une fontaine artésienne (120 pulvérisateurs d'eau) [voir Fig. n°IV.13]. La cascade et la fontaine ont été actionnées par intermittence de 9h00 à 21h00 avec les scénarios suivants :

- Cascade 10 min de fonctionnement toutes les 20 min.
- Fontaine : 03min de fonctionnement en période d'arrêt de la cascade soit 20 l/min.

Un modèle de soufflerie, anémomètre et thermocouple ont été mis en place afin de pouvoir mesurer la température de l'air devant et derrière le modèle des installations hydraulique la vitesse, température et humidité du vent.

---

<sup>1</sup> Auteurs de l'étude : Nishimura N, Numera T, Iyota H, Kimoto S. Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology. Solar Energy, 1998.

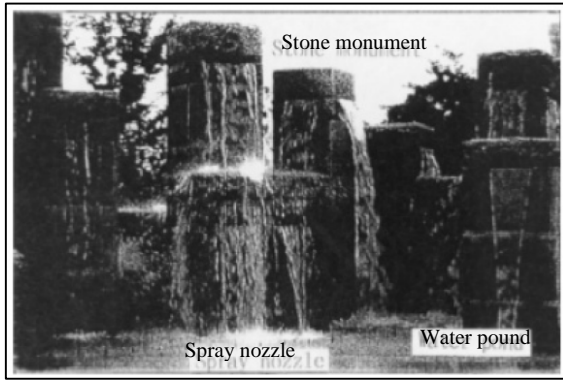


Fig. n°IV.13 : Installation d'eau étudiée  
Source Nishimura et al ,1998

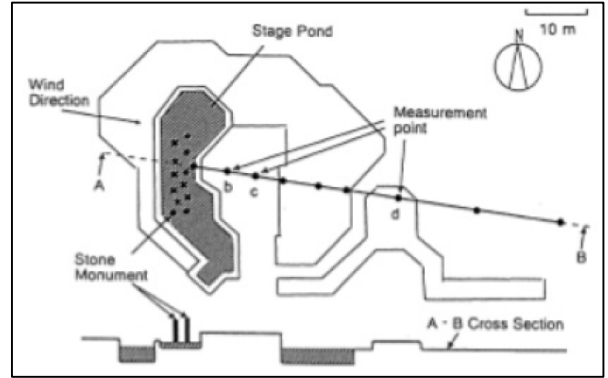


Fig. n°IV.14 : Système étudié et points de mesure  
Source Nishimura et al,1998

### V.1.3 Résultats obtenus :

Les mesures de température de l'air sous le vent ont mis en évidence une diminution d'environ 3°C de la température lors de la période de vaporisation de l'eau [Fig. n°IV.14 (a)] et que l'effet du système d'eau entre 14h et 15h peut être ressenti jusqu'à environ 35m du système d'eau [Fig. n°IV.14 (b)].

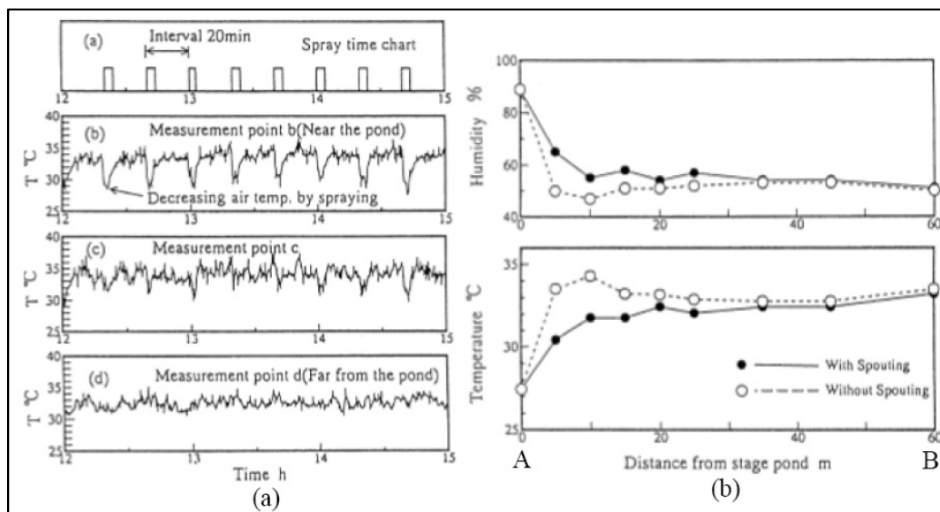


Fig. n°IV.15 : Résultats obtenus, Source : Nishimura et al, 1998

*“Les résultats ont confirmé les gammes qualitatives de l'effet de refroidissement produit par les installations hydrauliques réelles” [Nishimura et al, 1998]*

## V.2 Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : Influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs [Mirela Robitu, 2005]:

### V.2.1 Description et objectif de l'étude :

L'étude établie au niveau de l'université de la Rochelle avait pour objectif de démontrer et estimer l'influence de la végétation et surface d'eau sur le microclimat : température et humidité de l'air dans le square Fleuriot, situé dans la ville de Nantes en France. Le square est un espace minéral ouvert avec un étang d'eau et arbres de Magnolias [Fig. n°IV.15]

Les objectifs principaux du chercheur sont d'une part, le développement des connaissances relatives à micro climatologie urbaine, avec notamment la présence d'eau et de végétation en milieu urbain. D'autre part, l'étude vise à mettre au point des modèles mathématiques de bassin d'eau et de végétation, afin de pouvoir déterminer leurs effets sur le microclimat urbain et sur les conditions extérieures de confort thermique. [Robitu. M, 2005]



Fig. n°IV.16: Square Fleuriot, Nantes  
Source : Robitu. M, 2005

### V.2.2 Méthode adoptée :

Pour illustrer l'effet de ces deux éléments sur le confort en milieu urbain, des simulations ont été établies après intégration des modèles mathématiques développés dans les algorithmes de calcul du rayonnement (le logiciel SOLENE développé par CERMA) et de mécanique du fluide (FLUENT) et leur couplage. La journée de référence a été définie par les données climatiques de la ville ; une journée chaude, claire et ensoleillée du mois de juillet.

03 cas ont été simulés :

Cas A : le square Fleuriot avec bassin d'eau et sans arbres.

Cas B : le square Fleuriot avec arbres et sans bassin d'eau.

Cas C : le square Fleuriot avec bassin d'eau et arbres (situation actuelle).

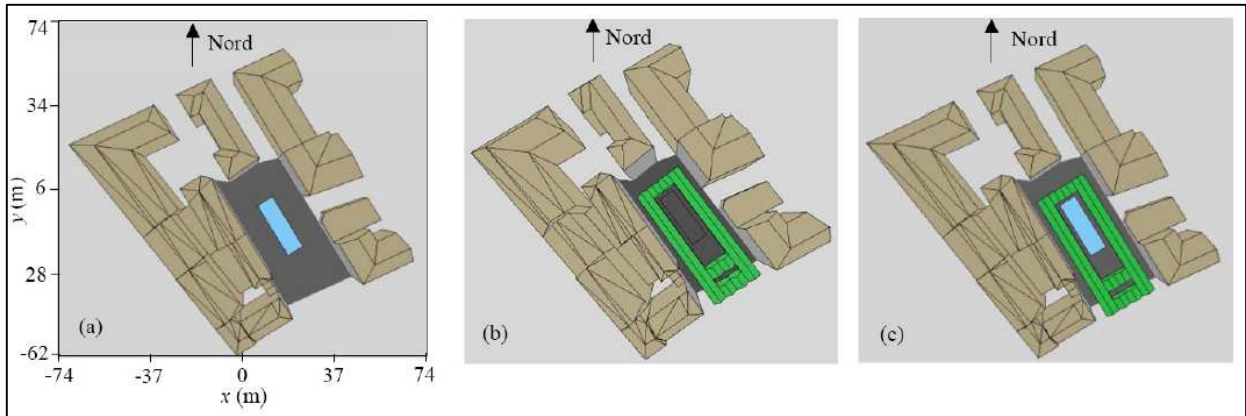


Fig. n°IV.17 : modélisation des 03 cas sur Solene  
Source : Robitu. M, 2005

Six points de mesures ont été choisis de façon à représenter les différents éléments de la place ; parois, sol et différentes situations d'exposition : au soleil, à l'ombre de la végétation et sur l'eau.

P1 ( $z=3\text{m}$ ) sur façade Nord-est des bâtiments.

P2 sur le sol à l'ombre produit par la couronne d'arbre.

P3 sur le sol proche de la façade Sud-ouest du bâtiment.

P4 sur le sol ensoleillé le matin.

P5 sur le sol proche du bassin d'eau.

P6 ( $z=0.5\text{m}$ ) sur la façade Sud-est des bâtiments.

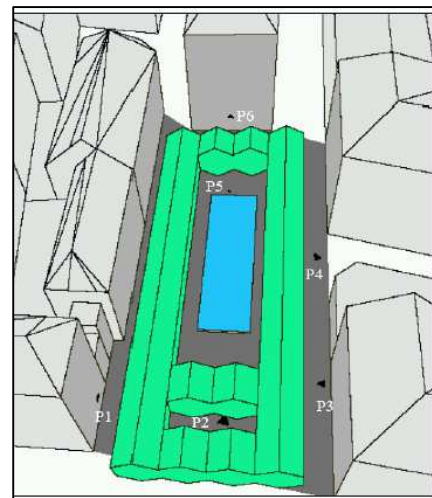


Fig. n°IV.18 : position des points de mesure.  
Source : Robitu. M, 2005

### V.2.3 Résultats obtenus :

- Les températures de surface minimale pour le cas avec bassin est de  $30^{\circ}\text{C}$ , valeur qui correspond à celle des façades non ensoleillées des bâtiments et de la surface d'eau. Pour le cas avec arbre elle est de  $25^{\circ}\text{C}$  (surface du sol ombrée par des arbres)
- La température du sol piétonnier près du bassin est plus élevée que celle de la surface d'eau, même situation enregistrée entre la température du sol piétonnier ensoleillé et ombré. La température de la surface du bassin d'eau est plus faible que celle de la même surface en asphalte. (en absence du bassin)



- La température de l'air dans le cas avec bassin d'eau est plus importante que celle des situations avec arbres. Cela s'explique par le fait qu'en situation avec bassin d'eau et sans arbres les surfaces du square sont plus exposées au rayonnement solaire, les échanges convectifs entre les surfaces et l'air ambiant sont plus importants

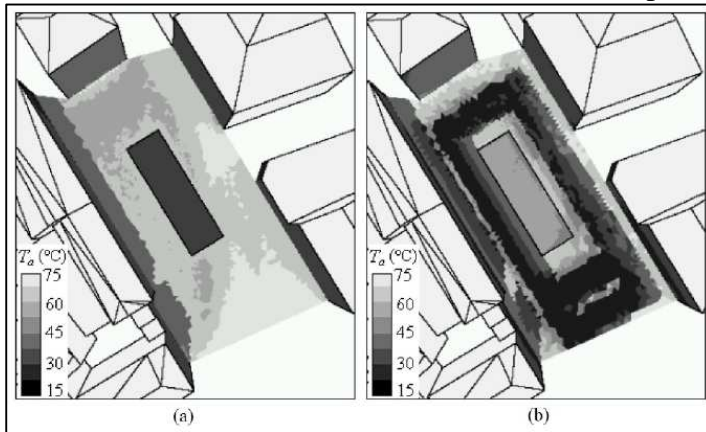


Fig. n°IV.19 : Valeurs de température de surface à 12h. Source : Robitu. M, 2005

- L'humidité relative varie de 38 à 50% pour le cas A avec bassin d'eau et de 40 à 52% pour les cas avec arbres B et C, le bassin d'eau entraîne une légère augmentation de l'humidité relative près de celui-ci. Par ailleurs et pour le cas avec bassin d'eau et arbres, sur le champ de l'humidité relative il y a l'influence de la température de la couronne foliaire des arbres.
- Les résultats montrent que les zones avec de fortes valeurs d'humidité spécifique correspondent aux zones à faible vitesse de vent et vice-versa car le vent favorise le transport de l'air humide, il est aussi remarqué une influence du bassin d'eau qui se traduit par une augmentation de l'humidité spécifique de l'air au dessus du bassin. Par ailleurs, on retrouve l'influence des arbres (cas B et C) qui se manifeste par une augmentation de l'humidité spécifique mais plus importante que dans le cas avec bassin.

En conclusion, la présence de l'eau et de la végétation au sein du milieu urbain diminue la température de l'air par évaporation et évapotranspiration d'eau. La végétation réduit la température des surfaces environnantes par l'ombre qu'elle produit, ces surfaces ombrées émettent moins de rayonnement de grande longueur d'onde et le transfert de chaleur vers l'intérieur des bâtiments est diminué, réduisant ainsi les consommations énergétiques pour refroidissement en période estivale.

*“Il est communément admis qu'il est difficile d'évaluer la réduction d'énergie due à la présence d'un bassin d'eau ou de végétation. Elle dépend du rapport de la surface de l'eau, du volume de la végétation, de la position par rapport aux bâtiments et des surfaces*

*urbaines, de la géométrie et des matériaux des bâtiments ainsi que des vents dominants.*''

[Robitu. M, 2005]

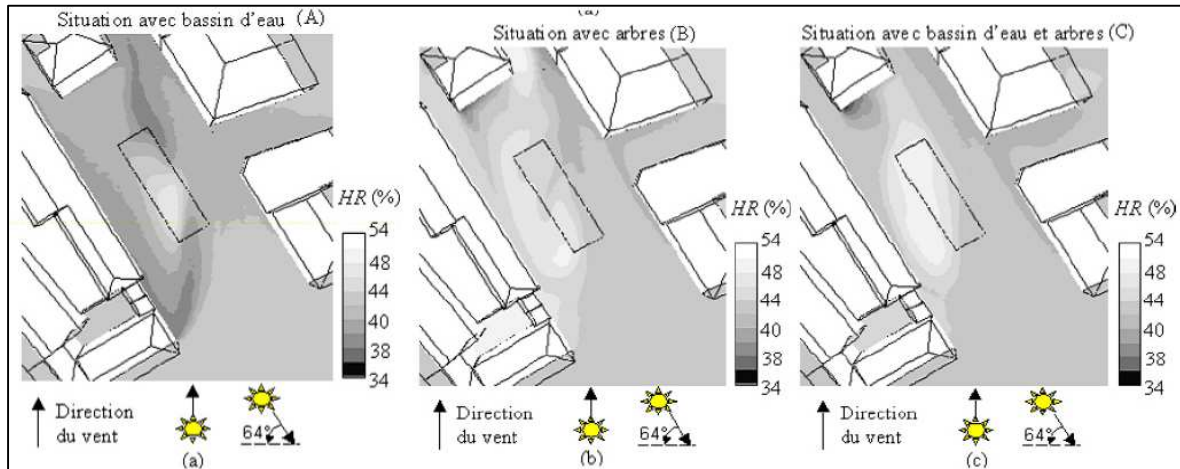


Fig. n°IV.20 : valeurs de l'humidité relative de l'air à 1.5m du sol. Source : Robitu. M, 2005

]

### V.3 Le rôle de la végétation et l'eau dans la création d'un microclimat urbain [Ballout. A, 2010]:

#### V.3.1 Description et objectif de l'étude :

L'objectif de l'étude est d'arriver à évaluer et quantifier l'impact de la végétation et l'eau sur le confort en milieu urbain et démontrer que la régulation thermique du microclimat urbain dans les régions à climat chaud et sec est possible par un choix judicieux de la taille, la disposition et la quantité de la végétation et étendues d'eau.

Le site d'étude choisi est la place Ain el fouara à Sétif, Algérie. Au delà des croyances liées à l'eau de la fontaine, la place constitue un espace propice au regroupement et récréation. De plus, Cette place qui est un espace minéral ouvert avec un point d'eau et de la végétation abondante, est un site qui offre l'opportunité de vérifier le rôle jumelé à la fois de l'eau et la végétation en termes de microclimat et confort.

#### V.3.2 Méthode adoptée :

La 2ème partie de l'étude concerne l'application de l'investigation sur terrain. Cette dernière comporte une campagne de mesures et un questionnaire, tous deux relatifs aux facteurs influents sur le confort thermique en milieu urbain. Par la suite une simulation basée sur l'outil informatique Envi-met permet de quantifier les impacts microclimatiques liés aux paramètres de la végétation et de l'eau sur le confort thermique extérieur et simuler plusieurs scénarios.

Les mesures se sont effectuées sur 03 jours significatifs, quatre points de mesure ont été choisis dans le but de répondre aux hypothèses. Chaque point représente des caractéristiques physiques différentes des autres ; présence de végétation proximité du point d'eau et l'exposition au rayonnement solaire.



Fig. n°IV.21 : les quatre stations réparties sur le site. Source Ballout. A, 2010

Une journée représentative est choisie : chaude, ciel complètement dégagé avec des brises légères de vent. Les résultats obtenus pour chaque station ont été comparés entre eux et avec ceux de la station météorologique.

Un questionnaire fût aussi dressé dans le cadre de cette recherche, l'échantillon choisi répond aux conditions de disponibilité et proximité.

Une simulation est utilisée ici en 2<sup>ème</sup> phase dans le but de vérifier et consolider les résultats obtenus lors de l'investigation et mettre en évidence de nouveaux éléments qui pourraient ajouter un plus dans la recherche. Deux logiciels sont utilisés ; Envi-met pour la modélisation du microclimat urbain et l'étude des paramètres affectant le confort en ville.

Le deuxième s'appelle psychcomfort.xls pour l'extraction des valeurs du PMV et du PPD.

Les paramètres étudiés sont la présence et la quantité d'eau d'une part et la densité du couvert végétal d'autre part. Cinq scénarios ont été établis ayant comme différence les deux paramètres cités ci-dessus. Une fois les résultats obtenus, ils ont été comparés avec les mesures in-situ, mais aussi comparés entre eux.

Scénario 01 : sans végétation et sans eau.

Scénario 02 : correspond à l'état actuel (avec fontaine et arbres)

Scénario 03 : même densité végétale avec une surface d'eau qui correspond au terreplein central soit 3,7% de la surface totale de la place

Scénario 04 : état du 3<sup>ème</sup> scénario avec l'ajout de deux bassins d'eau de chaque côté de la fontaine.

Scénario 05 : semblable au précédent avec une augmentation cette fois-ci de la densité de végétation (34,92% de la surface totale de la place).

### **V.3.3 Conclusion de l'étude :**

Les résultats obtenus démontrent une influence de la végétation sur le confort thermique et qui est approchée à travers la présence quantitative de la végétation dans l'espace de la place. D'autres paramètres pourraient être étudiés tels que : le type d'arbre, leur positionnement dans l'espace etc.

Pour l'eau aussi, un seul paramètre est pris en considération, quantitatif (la surface évaporative). Son effet reste très localisé, la surface de l'eau a une influence locale sur l'humidité spécifique de l'air, mais à degrés moindre sur sa température.

### **V.4 La recherche de Termotecina Group (1987,192)<sup>2</sup> "Exposition de Séville" :**

Nous avons jugé intéressant pour notre étude d'aborder cette exposition universelle, qui reste encore un exemple spectaculaire d'utilisation de l'eau pour le rafraîchissement, afin d'assurer un confort thermique pour 290.000 visiteurs des cent pavillons, répartis sur une surface totale de 215 ha.

L'eau a été utilisée sous forme de fontaines, bassins et cascades (une des cascades est de 400m de long et de 6m de dénivelée le long de Maple avenue).

Des tours de refroidissement, hautes ont aussi été créées, elles sont équipées à leurs sommets d'un système de captation du vent et de pulvérisateurs d'eau (générateurs de brouillards répartis sur toutes leurs hauteurs). L'évaporation de l'eau rafraîchit considérablement l'air et crée un courant convectif vers le bas.

Le système de brouillard artificiel utilisé à Séville, reprend sous une forme plus technologique, le principe de l'humidification de l'air utilisé en architecture vernaculaire. La réussite de ce système réside dans l'exact équilibre entre un minimum d'efficacité et le risque d'écoulement sous forme liquide. L'eau doit en effet dans ce cas rester sous forme de vapeur. L'autre réussite réside dans le maintien des conditions climatiques suffisamment sèches pour permettre à l'évaporation de se produire. [Izard J-L, 1993]

Aussi, tout au long des avenues, des systèmes de pulvérisation d'eau ont été placés dans le feuillage des arbres et sur les structures des pergolas, afin de créer en permanence un flux d'air frais.

---

<sup>2</sup> Équipe de recherche regroupant : architecte, planificateurs et représentants des autorités

A Séville le procédé de rafraîchissement par évaporation permet un abaissement de la température de pointe d'environ 7 °C.

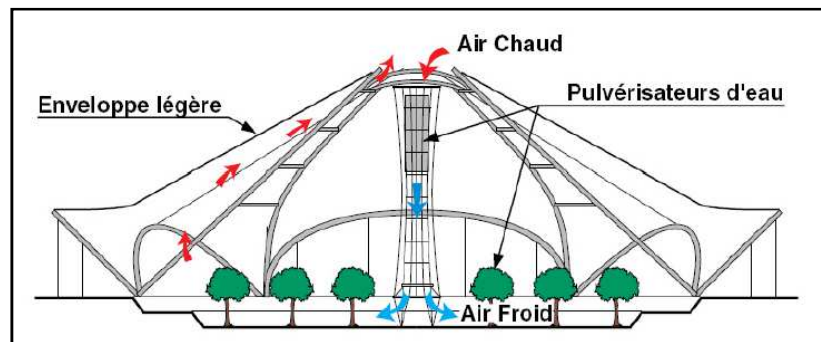


Fig. n°IV.22 : coupe schématique du système de refroidissement de la Rotunda, Expo Séville, Espagne. Source : PLEA, 1991.



Fig. n°IV.23 : Tour de refroidissement  
Source : Alvarez et al



Fig. n°IV.24 : Brumisation dans la végétation  
Source : Alvarez et al

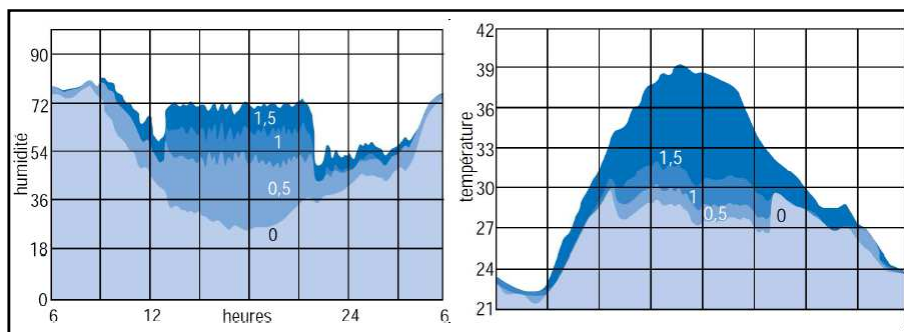


Fig. n°IV.25 : effets climatiques du rafraîchissement par humidification utilisé à Séville au pavillon de la CE, 1992. Source : Izard J-L, 1993

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un ensemble d'interactions entre microclimat-aménagement urbain et bâtiments ; chacune de ces trois grandeurs a une influence sur les consommations énergétiques enregistrées au cours de l'année.

L'échelle choisie pour notre étude est l'échelle microclimatique. A ce niveau, l'homme peut intervenir pour l'amélioration des conditions climatiques en installant des dispositifs d'eau, des plantations, un choix judicieux de matériaux, etc.

Les paramètres climatiques sont un facteur déterminant des consommations énergétiques dans les bâtiments. Cette consommation, à son tour contribue à l'amplification des nuisances et problèmes que connaissent les villes, notamment le phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

Nous avons vu aussi que les aménagements urbains (arbres, parcs, surfaces d'eau...) sont des éléments qui influencent d'une part, les conditions climatiques de notre urbain et d'autre part les consommations énergétiques à l'intérieur des bâtiments. Cette influence a été évaluée et quantifiée à travers de nombreuses études, et dans le cadre de notre recherche, il est à retenir que l'eau a une inertie thermique qui ne lui permet pas une augmentation considérable de sa température ainsi qu'une faible réflectivité. Elle absorbe aussi, une grande quantité d'énergie qu'elle soustrait à l'air et n'en restitue qu'un faible pourcentage.

Les études abordées, s'intéressent dans leur majorité à l'effet combiné, de la végétation et l'eau. L'influence de l'eau reste moindre que celle de la végétation, cette dernière par son ombre et le phénomène d'évapotranspiration ainsi que son effet d'atténuation des vents et dimensions esthétiques, assure plusieurs fonctions.

En milieu urbain, les études abordées ont montrées que l'eau, apporte à son tour aussi des améliorations mais qui restent minimes et locales. Son effet sur l'humidité reste plus important que celui sur la température. Cette amélioration dépend de la surface d'eau

Cependant, une cascade, un jet d'eau comme ceux expérimentés par [Nishimura N et al, 1998], ont un effet plus important que celui des bassins. Des réductions atteignant jusqu'à 3°C, ont été observées.

L'exposition de Séville et par la suite celle de Saragosse, sont deux exemples spectaculaires de l'utilisation de l'eau pour le rafraîchissement par évaporation. L'eau est pulvérisée et mise en forme dans des fontaines, jet d'eau...

Dans la partie qui suit, nous tendons à démontrer, expérimentalement, les améliorations que peut apporter la présence de tels dispositifs, en un milieu urbain, dans une zone à climat sec et aride. La température et l'humidité seront les principaux éléments étudiés.

# **CHAPITRE **V**:**

**PROCESSUS MÉTHODOLOGIQUE**



## **Introduction :**

Dans la première partie de notre manuscrit, nous avons insisté sur le fait que la présence de l'eau était un point déterminant dans l'analyse du microclimat urbain. Les principes et les phénomènes ayant été décrits, il est maintenant temps d'essayer de quantifier les différents impacts et effets.

Il est important de rappeler que ce travail n'ambitionne pas d'étudier les aspects morphologiques à une échelle de quartier, mais plutôt de concentrer la recherche sur l'effet de la présence de dispositif d'eau en espace urbain. L'influence qu'elle pourrait avoir ; d'une part sur la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air, et d'autre part l'étendue de cet effet sur les bâtiments et par conséquent sur l'amélioration des conditions de confort des individus.

Nous abordons alors, dans un premier temps, la présentation du climat choisi et dont les données seront utilisées par la suite dans notre modélisation. Les valeurs moyennes annuelles et estivales de température et humidité relative ainsi que la vitesse et direction des vents correspondent aux données climatiques de la wilaya de Biskra. Notre étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche de refroidissement par évaporation ; afin de donner ses preuves, le climat aride avec son hiver froid et humide et un été chaud et sec semble être le plus approprié.

Nous procéderons par la suite à une présentation du logiciel de simulation choisi. Le recours à la technique de simulation répond le plus à nos objectifs de recherche, car elle offre une grande flexibilité, quant au contrôle des paramètres d'entrée et calcul.

Une fois les principes du code fluent présentés, nous aborderons les trois cas choisis pour notre étude. Il s'agit de trois fragments urbains, d'échelles et configurations différentes.

Chacune des trois scènes a pour objectif, de tester l'impact supposé du jet d'eau -avec des conditions d'entrée différentes- sur les conditions microclimatiques, à savoir : la température, l'humidité relative et le mouvement de l'air.

## II. Analyse climatique de la wilaya de Biskra :

L'Algérie, premier pays d'Afrique par sa superficie, 2 381 741 km<sup>2</sup>, dont les quatre cinquième sont occupés par le Sahara. Elle comprend deux grands ensembles géographiques, les chaînes de l'Atlas au nord et le Sahara au sud. Ces variétés d'étendues lui confèrent une variété dans le paysage géographique et climatique.

Le climat aride règne sur la majorité des villes algériennes, caractérisées par un couvert végétal épars ou totalement absent. En période estivale les villes sont exposées à des vagues de chaleur importante et développent de plus en plus fréquemment certains problèmes comme la surconsommation énergétique due à la climatisation.

La ville de Biskra, située au sud-est de l'Algérie ; constitue la porte du désert avec une latitude de 34,8°, une longitude de 5,73 Est, et une altitude de 87m. Sa superficie est de 20 986km<sup>2</sup> avec une population estimée en 2008 à 721 356 habitants, ce qui correspond à une densité de 34 hab/ km<sup>2</sup>.

D'après la classification des zones climatiques d'hiver, la wilaya de Biskra se trouve en zone H3a : caractérisée par hiver très froid la nuit par rapport au jour, on y enregistre donc un important écart jour et nuit. Tandis que son été est très chaud et sec, ce qui correspond à la zone climatique d'été E3. (Voir Fig. V.1et V.2)

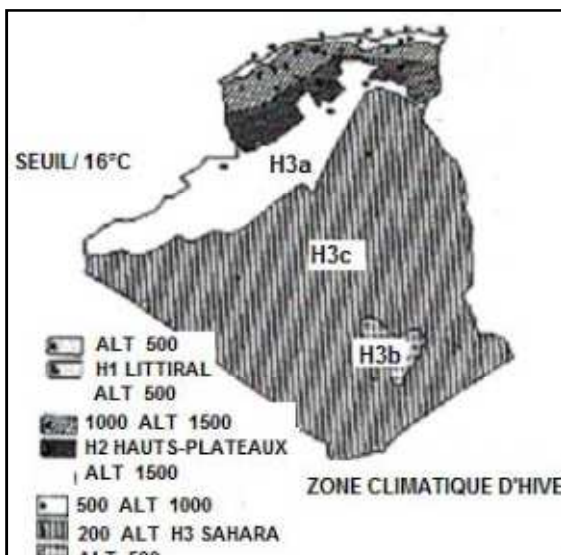


Fig. n° V.1 : Zones climatique d'hiver, Algérie Source: ENAG, 1993.

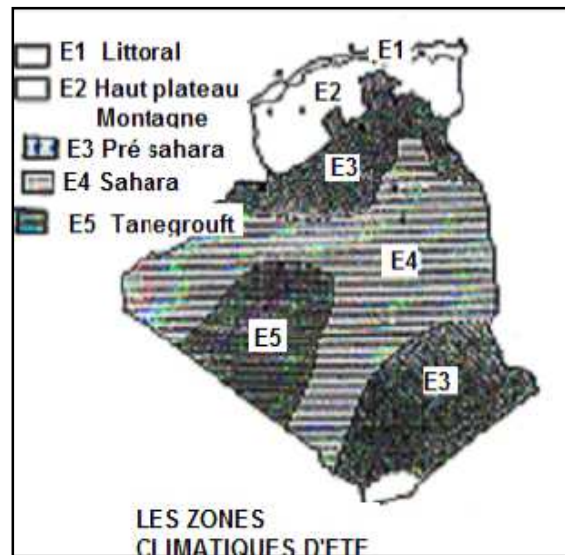


Fig. n° V.2 : Zones climatique d', Algérie Source: ENAG, 1993.

## II.1 La température :

La température est une grandeur physique qui indique le taux d'échauffement et de refroidissement de la surface de la terre, elle est aussi un facteur très important qui conditionne les phénomènes et les paramètres hydrologiques.

Les données climatiques de la wilaya de Biskra, montrent que la température moyenne annuelle est de 22,25°C. Avec une valeur maximale de 34,40°C en mois de juillet, le mois le plus chaud.

Ces variations de températures définissent deux saisons thermiques dans la wilaya de Biskra :

- Saison chaude : qui s'étend de Mai à Octobre, pendant laquelle les températures moyennes sont supérieures à la moyenne annuelle.
- Saison froide : qui correspond à la période de Novembre à Avril.

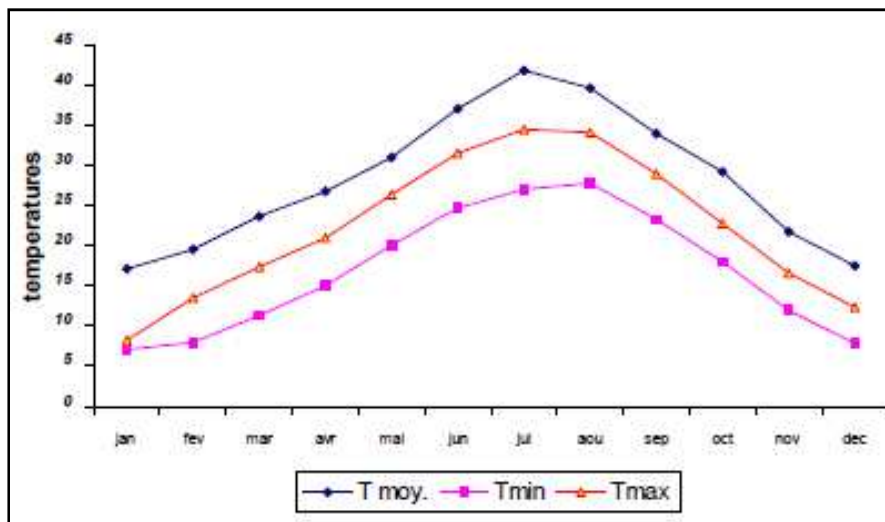


Fig. n° V.3 Température de l'air extérieur. Période « 1997-2007 »  
Source : données station météo Biskra

## II.2 L'humidité relative:

L'humidité relative indique une évolution directe du pouvoir évaporant de l'air.

Dans la wilaya de Biskra, l'humidité relative dépasse les 50% pendant huit mois avec 73% en mois de Décembre. Alors qu'elle est inférieure à 50% pendant l'été (Juin, Juillet, Août) avec une valeur de 26% en Juillet. Ce qui confirme que le climat de la ville de Biskra est humide et froid en hiver et assez sec et chaud en été.

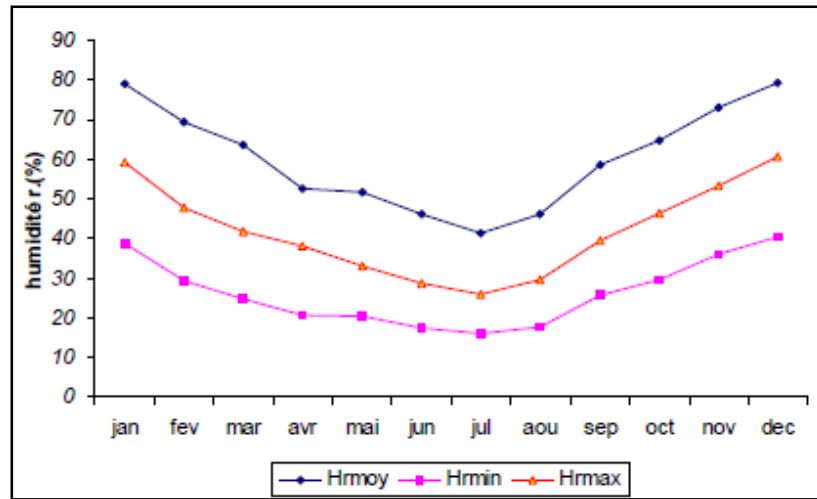


Fig. n° V.4: Humidité relative (%) période « 1997-2007 »  
 Source : données station météo Biskra

### II.3 Le vent :

Le vent est un écoulement d'air qui tend à équilibrer des zones de pression différentes dans l'atmosphère. Les variations dans les distributions des pressions et températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur l'ensemble du globe terrestre, et aux différences dans les propriétés thermiques des surfaces des continents et océans. Lorsque les températures de l'environnement deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'élever et s'écouler par dessus l'air le plus froid qui est plus lourd.

Les vents qui prédominent à la ville de Biskra se diffèrent suivant la saison :

- En hiver : vent dominant Nord-ouest (vents froids)
- En été : elles proviennent du Sud-est (vents chauds et secs).

Avec des vitesses moyennes qui varient entre 3.49 m/s, la période des vents poussiéreux s'échelonne entre le mois de mars et mai.

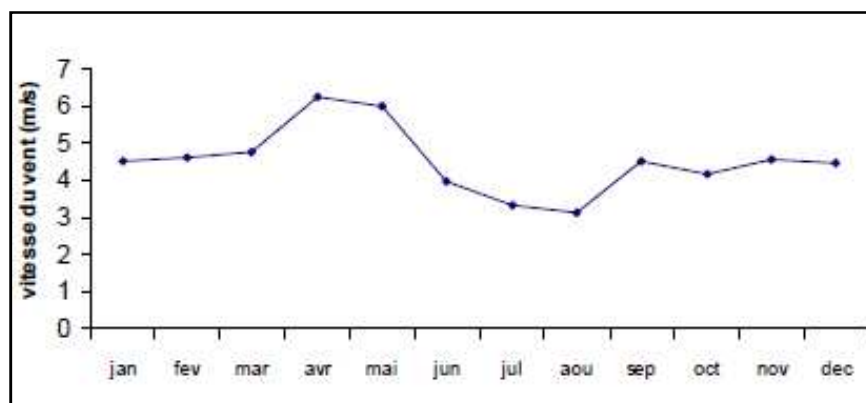


Fig. n° V.5: Vitesse du vent (m/s) période « 1997-2007 »  
 Source : données station météo Biskra

## II.4 Les précipitations :

Les précipitations sont influencées par les mouvements des vents et les changements des régimes de températures. Elles représentent un facteur déterminant dans la classification des climats.

Les précipitations sont très faibles, inférieures à 200 mm/an. La répartition annuelle des précipitations est marquée par une importante période de sécheresse (cinq mois : mai juin, juillet, août, et septembre) où les précipitations sont très faibles, et si elles existent, elles tombent sous forme d'orage, et provoquant parfois des crues et des débordements d'oued.

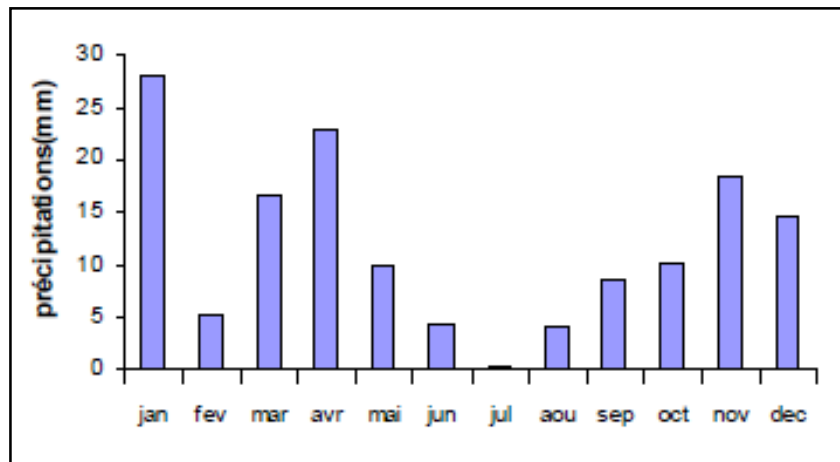


Fig. n° V.6: Précipitation en (mm) période « 1997-2007»  
Source : données station météo Biskra

La gelée a une fréquence moyenne de 37 jours/ an avec une valeur maximale au mois de décembre et une absence totale de la gelée pour la période Mai- Septembre.

## II.5 Durée d'insolation :

L'insolation mensuelle effective est à la moyenne de 283,11 heures. La valeur maximale (480,36 heures) est enregistrée en Juillet et le minimum (148,78 heures) en mois de Février.

## II.6 L'évaporation :

Elle atteint ses valeurs plafonds, pendant la saison chaude, avec un maximum de 350mm en juillet.

## II.7 Calcul de l'indice d'aridité:

Im: indice d'aridité.

P : précipitations annuelles.

T : température moyenne annuelle.

$$Im = 143.23 / (22.25 + 10) = 4,44$$

La lecture caractéristique de cet indice se fait de la manière suivante

Lorsque :  $Im < 05$  climat hyper aride.

$05 < Im < 10$  climat aride.

$10 < Im < 20$  climat semi aride.

$20 < Im < 30$  climat semi humide.

$30 < Im < 55$  climat humide.

$Im = 4,44$  donc  $Im < 05$ ..... Climat hyper aride.

### *Synthèse :*

Le désert constitue le plus grand secteur géographique de notre pays et qui est encore peu habité. La zone d'étude choisie, fait partie de la région aride. Caractérisée par pratiquement uniquement deux saisons ; une froide avec un climat froid et humide et une deuxième chaude, son climat est chaud et sec. Ce type de climat, présente quelques inconvénients quant au confort des individus à l'intérieur des bâtiments. La température élevée a une influence prépondérante sur la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir par refroidissement (en saison estivale) une température d'air intérieur plus confortable que celle de l'extérieur. Aussi, le faible taux d'humidité en de telles températures produit un important taux de sudation, le corps transpire et cette eau sera absorbée par l'air, ce qui dégagera une sensation de sécheresse et inconfort chez les individus.

D'après les résultats de cette analyse, il ressort que le mois de juillet est le mois le plus chaud et le plus sec, avec des températures moyennes égales à 34,4°C et des pics dépassant 40°C. L'écart journalier est d'environ 18°C.

Le mois de juillet à Biskra est aussi caractérisé par un faible taux d'humidité relative (valeur moyenne de 25%), de faibles vitesses de vent et une grande durée d'ensoleillement. Face à cette situation, le besoin de moyen de rafraichissement et de protection est indispensable. Le recours aux protections solaires, surfaces ombrées et un rafraichissement par humidification pourrait être la solution idéale dans ce cas. C'est pour ses raisons que le choix s'est porté sur la ville de Biskra, afin de pouvoir tester la validité de nos hypothèses dans des conditions extrêmes.

### **III. Pourquoi avoir choisi la simulation ?**

La simulation peut être définie comme ; une reproduction des conditions réelles dans les quelles devrait se produire une opération complexe, ou comme une représentation d'un objet par un modèle analogue plus facile à étudier. Le modèle de simulation ou, par abréviation, simulation est aussi défini comme une représentation mathématique d'un certain nombre d'éléments pouvant intervenir sur un système, afin d'étudier les conséquences de la variation de certains de ces éléments.

Les interactions entre les surfaces des bâtiments, l'eau et les paramètres climatiques d'un environnement urbain sont complexes. Les effets induits sur le microclimat sont nombreux (échauffement, refroidissement, recirculation d'air, etc.), afin de vérifier ces changements les simulations numériques semblent être les plus appropriées. En d'autres termes elles nous permettent de déterminer selon besoin, les variables qu'on veut tester tout en supposant que les autres valeurs restent constantes.

La simulation présente aussi plusieurs avantages quant à sa flexibilité, son coût qui est relativement moins cher que celui des campagnes de mesures ainsi que la possibilité de contrôler et modifier les paramètres de calcul :

- La flexibilité des outils de simulation et le temps de calcul permettent d'apporter des réponses relatives à des variations concernant de nombreux paramètres ; il s'agit de maquettes numériques qui offrent une grande possibilité de changement et à moindre coût.

- Le contrôle des paramètres de calcul se prête bien au traitement de la complexité, l'hétérogénéité et la non-linéarité des systèmes climatiques.

- Le degré de précision qu'offrent les outils de simulation est aussi un point très important, car cela permet d'avoir des réponses précises aux hypothèses de travail.

D'autre part, l'utilisation des mesures ou autre technique dans notre cas s'avère pratiquement impossible vu le manque, voir même l'absence de dispositifs d'eau dans nos espaces urbains.

### **IV. Présentation du code CFD “ Fluent” :**

L'utilisation des codes de champs dans le domaine du bâtiment a débuté dans les années 1970 avec les travaux de Launder et Spalding. De nos jours, ces codes deviennent de plus en plus adaptés aux capacités de calcul des outils informatiques, ils offrent dès lors, un

potentiel d'applications plus étendu que les codes simplifiés, permettant ainsi de déterminer les écoulements d'air, les champs de températures ou encore la distribution des polluants. [Cordier. N, 2007].

Fluent, version commerciale des CFD, est un code numérique qui permet la modélisation et la simulation des fluides ainsi que les transferts de chaleur associés dans des géométries complexes [fluent, 2006]. Il offre l'avantage d'une grande flexibilité au niveau des maillages, avec notamment la possibilité de résoudre avec beaucoup de facilité des problèmes d'écoulement dans des cas de maillages non structurés [Bouyer. J, 2009]. Il permet aussi de travailler sur des maillages 2D triangulaires ou quadrangulaires et 3D tétraédriques, hexaédriques, pyramidaux ou hybrides. Pour réaliser un modèle, une discrétisation spatiale du domaine d'étude, indispensable à toute modélisation, peut être réalisée dans l'outil complémentaire Gambit (modeleur-mailleur) qui propose des facilités pour préparer la géométrie à la simulation Fluent. Il est également possible de raffiner ou de dilater le maillage – selon besoin et objectifs de l'étude- à partir des résultats de simulation obtenus, directement dans Fluent. Pour cette raison principalement, en plus de la disponibilité du software et la faisabilité de la modélisation, notre choix s'est porté sur fluent.

L'outil permet de simuler les écoulements dans diverses situations physiques comme les écoulements compressibles ou incompressibles, laminaires ou turbulents, en régime permanent ou transitoire avec la possibilité de faire appel à des méthodes de résolution adaptées à la physique du phénomène étudié. Il est également possible de traiter les mélanges de fluides, les changements de phase, la combustion et d'autre processus complexes.

Le moteur de calcul de Fluent est développé en langage C et utilise toutes les potentialités de ce langage, parmi elles l'allocation de mémoire dynamique et la gestion de structures de données. De plus l'architecture du solveur permet en outre de fonctionner à distance sur des processeurs puissants, voire de paralléliser les calculs. [Bouyer J, 2009]

#### **IV.1 Equations de base de Fluent :**

Le principe de base de la dynamique des fluides en général, est de résoudre un système d'équations vectorielles aux dérivées partielles non-linéaires appelées équations de Navier-Stokes. Ce système est composé de trois équations de bilan fondamentales : l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation du mouvement, puis,



pour des écoulements compressibles et/ou avec transfert de chaleur, une équation de conservation de l'énergie. Pour les écoulements impliquant des mélanges d'espèces ou des réactions chimiques, une équation de la conservation des espèces chimiques est résolue. Des équations de transport supplémentaires sont également résolues lorsque le régime de l'écoulement est turbulent.

#### IV.1.1 L'équation de conservation de la masse ou équation de continuité :

La forme générale de l'équation de conservation de la masse, valable à la fois pour les écoulements incompressibles et compressibles est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = Sm \quad Eq (V.1)$$

Avec :

$\rho$ : Masse volumique du fluide

$\vec{v}$ : Vitesse du fluide sous forme vectorielle  $\vec{v}$  ( $v_x; v_y; v_z$ )

$Sm$  : Masse ajoutée ou retirée au domaine de fluide (en générale nulle, mais peut prendre des valeurs positives dans le cas de phénomènes comme l'évaporation).

#### IV.1.2 L'équation de conservation du mouvement :

L'équation de conservation du mouvement est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\bar{T}}) + \rho \vec{g} + \vec{S}_{ext} \quad Eq (V.2)$$

Avec :

$p$  : Pression statique

$\bar{\bar{T}}$  : Tenseur des contraintes appliquées au fluide

$\rho \vec{g}$  : Force de la pesanteur

$\vec{S}_{ext}$ : Somme des forces exercées par les corps extérieurs

L'expression du tenseur des contraintes est donnée par :

$$(\bar{\bar{T}}) = \mu D = \mu [ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I ] \quad Eq (V.3)$$

$\mu$ : viscosité moléculaire

$D$  : effet de la dilatation volumique

### IV.1.3 L'équation de conservation de l'énergie :

L'équation de conservation de l'énergie est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \left( k_{eff} - \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{T}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad Eq (V.4)$$

L'équation de conservation de l'énergie est donnée par :

$k_{eff}$ : Conductivité thermique effective

$\vec{J}_j$ : Flux de diffusion de l'espèce j dans le fluide

$S_h$ : source chaleur apportée par réaction chimique ou autre réaction exothermique

Les trois termes  $(k_{eff} - \nabla T)$ ,  $(\sum_j h_j \vec{J}_j)$  et  $(\bar{T}_{eff} \cdot \vec{v})$  représentent les contributions au transfert d'énergie par conduction, par diffusion des espèces et par dissipation visqueuse, respectivement.

E : représente l'énergie totale contenue dans l'élément fluide et se décompose ainsi :

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad Eq (V.5)$$

h : est l'enthalpie sensible définie pour les écoulements incompressibles des gaz parfaits par :

$$h = \sum_j Y_j \vec{h}_j + \frac{p}{\rho} \quad Eq (V.6)$$

$Y_j$ : est la concentration massique de l'espèce j dont l'enthalpie spécifique est donnée par :

$$h_j = \int_{T_{eff}}^T c_{p,j} dT \quad Eq (V.7)$$

$T_{ref}$  est la température à laquelle sont prises les constantes physiques du fluide.

### IV.1.4 Modélisation de la turbulence :

Le mouvement d'air présente une agitation qui est généralement importante et que l'on qualifie de turbulence.

Deux nombres caractérisent le régime turbulent. Tous deux comparent les facteurs « déstabilisateurs » aux facteurs « stabilisateurs » de l'écoulement. Lorsque le rapport de ces deux facteurs est supérieur à une valeur critique, le régime d'écoulement est alors turbulent.

a) Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad Eq (V.8)$$

Avec :

$\nu$  : vitesse de la viscosité cinématique du fluide.

$L$  : longueur caractéristique de l'écoulement.

$U$  : vitesse moyenne du vent.

La transition des deux régimes se fait aux environs de  $Re = 5.10^5$ .

b) Le nombre de Rayleigh :

Correspond au rapport entre les forces convectives liées à un écart de température et les forces de viscosité.

$$Ra = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu\alpha} \quad Eq (V.9)$$

À une valeur supérieure à  $Ra = 5.10^4$ , l'écoulement est considéré comme turbulent.

Fluent propose plusieurs modèles de turbulence, issus de la décomposition du nombre de Reynolds [Fluent, 2006]. Dans notre travail, nous avons opté pour le modèle  $K - \omega$  et ses dérivées. Ce modèle intègre des modifications pour traiter les effets turbulents à bas nombre de Reynolds. Un modèle standard économique en temps et qui correspond à nos besoins.

#### **IV.1.5 La modélisation des transferts d'humidité :**

Fluent peut modéliser le mélange et le transport d'espèces chimiques de par la résolution d'équations de conservation pour chaque composant, ceci avec ou sans réaction chimique.

Dans notre travail, nous modélisons la canopée urbaine comme un volume d'air humide où, du fait de l'importance de l'humidité dans le système climatique il faut modéliser les phénomènes liés à la présence de vapeur d'eau.

## **V. Présentation du modèle d'étude**

### **V.1 Choix de la scène urbaine :**

Deux solutions sont envisageables pour constituer l'objet de notre étude ; le fragment urbain théorique ou réel. Opter pour une configuration urbaine simplifiée et proche du réel était notre choix, car notre but n'est pas d'étudier les aspects de la morphologie urbaine et leurs interactions, mais plutôt se concentrer sur l'effet de l'eau -comme dispositif d'aménagement- sur les conditions climatiques de l'espace extérieur et par conséquent son

influence sur les températures atteignant les parois et qui déterminent en partie celles de l'intérieur du bâtiment.

Nous avons donc, composé trois formes urbaines, d'échelles différentes. La première est un tissu dense qui englobe un ensemble de bâtiments de hauteurs et configurations différentes. La deuxième est un fragment moins complexe, a une échelle d'étude réduite. Tandis que la troisième est une scène urbaine simplifiée qui réunit un ensemble de critères nécessaires à notre étude.

Cette différence d'échelles nous permettra d'étudier à la fois, l'effet de la présence d'eau sur un microclimat urbain et aussi, l'étendue de cette influence sur les conditions de confort internes de notre système (bâtiment) représenté ici, par son enveloppe.

### **V.1.1 Premier cas :**

Le fragment urbain que nous avons composé pour ce cas, regroupe un ensemble de constructions avec un jet d'eau disposé en plein centre de notre scène.

Une scène urbaine réelle, réunit une variété de type de bâtiments, c'est pourquoi nous avons tenté de reprendre cette diversification au niveau de notre fragment. On a des constructions de différents types, hauteurs, configurations, types de toiture, etc.

Ce choix, tend à approcher d'une part les réactions en milieu urbain dans des conditions de température ambiante, mais aussi nous permettra d'observer l'influence des formes des bâtiments sur les écoulements de l'air.

Les simulations dans ce 1<sup>e</sup> cas se feront, avec une température ambiante de 24°C, et une humidité relative de 40%. Ces conditions se rapprochent des valeurs moyennes de la wilaya de Biskra.

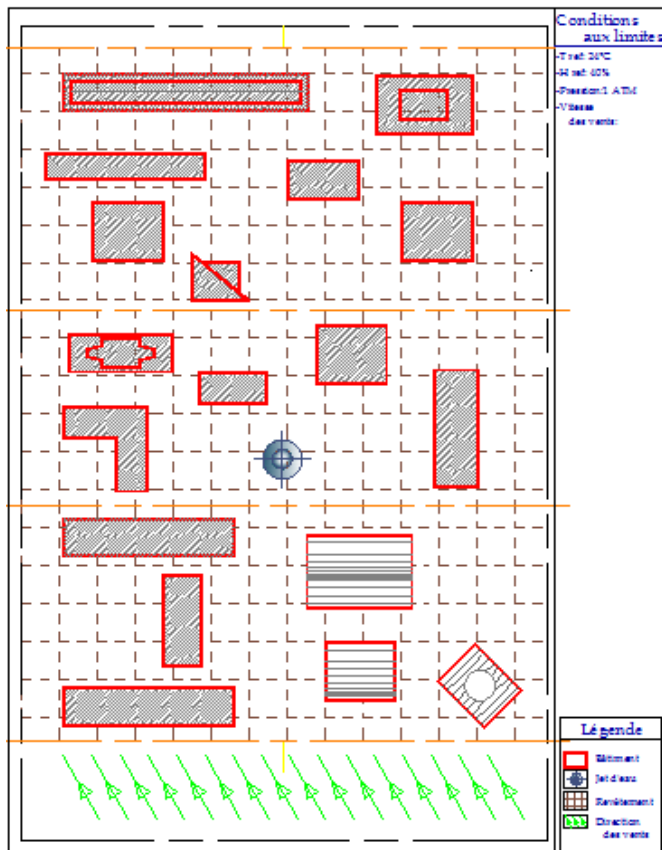


Fig. n° V.7: vue en plan de la scène urbaine.  
 '1<sup>e</sup> cas' Source : Auteur.

### V.1.2 Deuxième cas :

Notre 2<sup>e</sup> scène est composée de cinq bâtiments, avec un espace central dégagé. Les bâtiments qu'on va nommer A, B, C, D et E, correspondent à des formes typiques de bâtiment standard, parallélépipédiques de hauteurs et configurations différentes.

Notre hypothèse pour ce cas de figure, est que les bâtiments, B, D et E., bénéficieront le plus de l'amélioration que pourrait apporter le jet d'eau, vu leur proximité de ce dernier.

Nous nous intéresserons en particulier aux valeurs de température et humidité relative enregistrées au niveau des façades du bâtiment B.

La vitesse d'écoulement d'air sera aussi étudiée. Dans cette scène, de forme simplifiée et dégagée, l'hypothèse liée à vitesse de l'air suppose que s'il y aurait des variations, elles ne seront pas dépendantes de la configuration mais plutôt des interactions entre les paramètres climatiques.

La température d'entrée pour ce cas est de 38°C, l'humidité de l'air est de 20% avec une vitesse de l'air de l'ordre de 3 m/s.

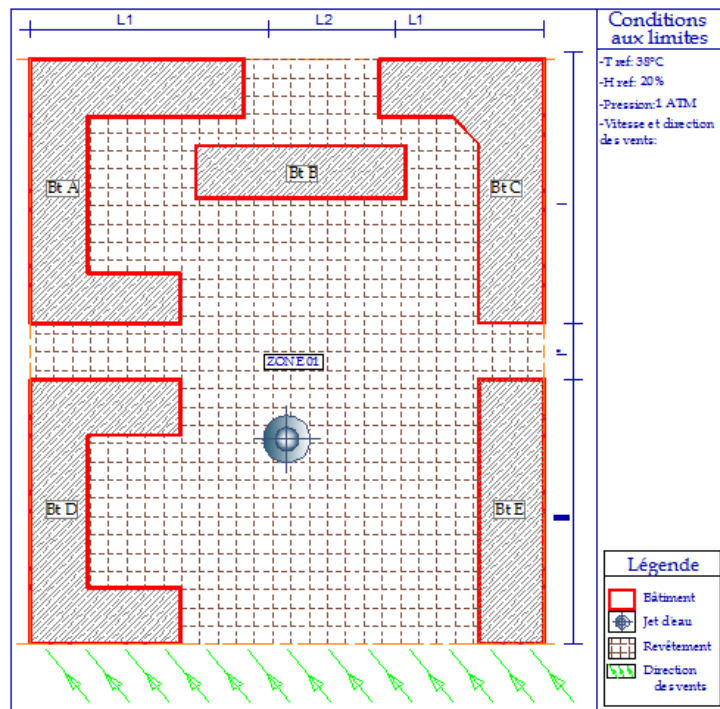


Fig. n° V.8: vue en plan de la scène urbaine. Source : Auteur.

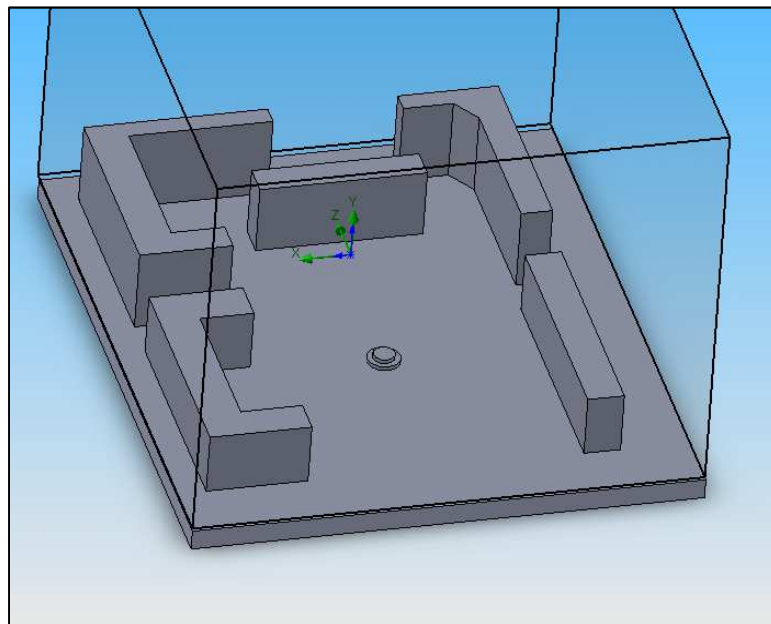


Fig. n° V.9: volumétrie de la scène urbaine. Source : Auteur.

### V.1.3 Troisième cas :

Notre troisième scène est composée de trois bâtiments, un espace extérieur et un jet d'eau. Les bâtiments qu'on va nommer A, B, C, correspondent à des formes typiques de bâtiment standard, parallélépipédiques de hauteurs et configurations différentes.

Le but de cette modélisation, traduit par cette différence d'échelle, est d'observer les phénomènes microclimatiques modifiés par la présence de l'eau, dans un fragment urbain réduit.

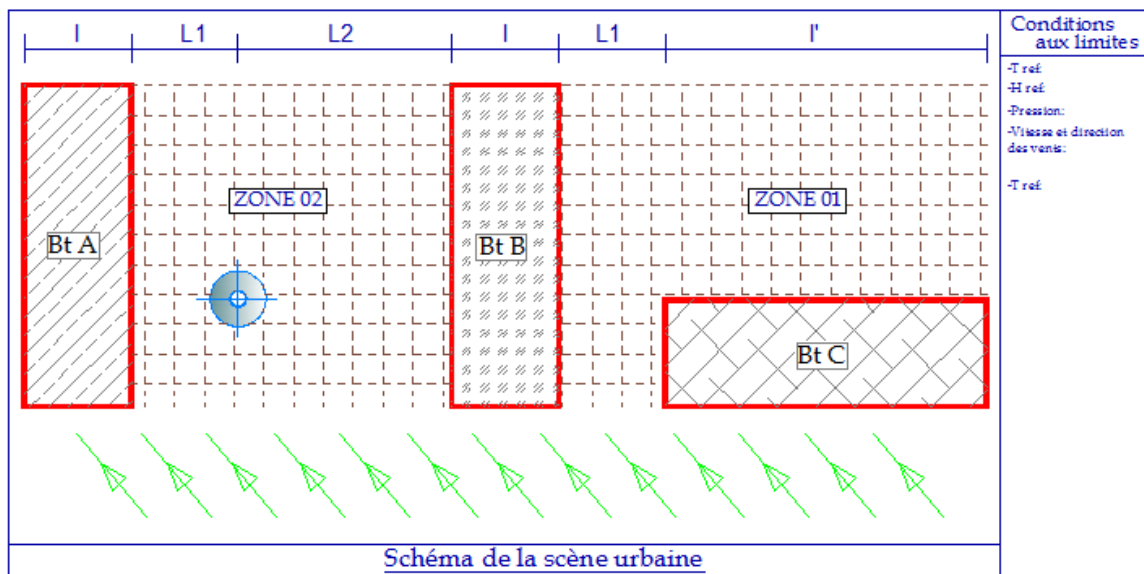


Fig. n° V.10: Vue en plan de la scène urbaine choisie pour le 3<sup>e</sup> cas.  
Source : Auteur.

### V.1.4 Les bâtiments :

a) *Hauteurs des bâtiments* : l'air est en continuel mouvement, le chaud est plus léger et se trouve généralement concentré en hauteur, tandis que l'air frais, lourd se trouve en bas. Ces déplacements d'air extérieur peuvent influencer les mouvements d'air à l'intérieur des bâtiments.

La différence d'hauteurs voulue entre les bâtiments a pour but de démontrer jusqu'à quel niveau s'étend l'influence supposée du jet d'eau ; si cette amélioration peut atteindre les hauteurs standard des bâtiments. Et aussi si cela peut être bénéfique au niveau des parois qui constituent l'enveloppe des constructions.

La hauteur  $H_a$  correspond – selon notre choix- à celle d'un bâtiment d'habitation de R+5,  $H_b = R+4$  et  $H_c = R+3$ .

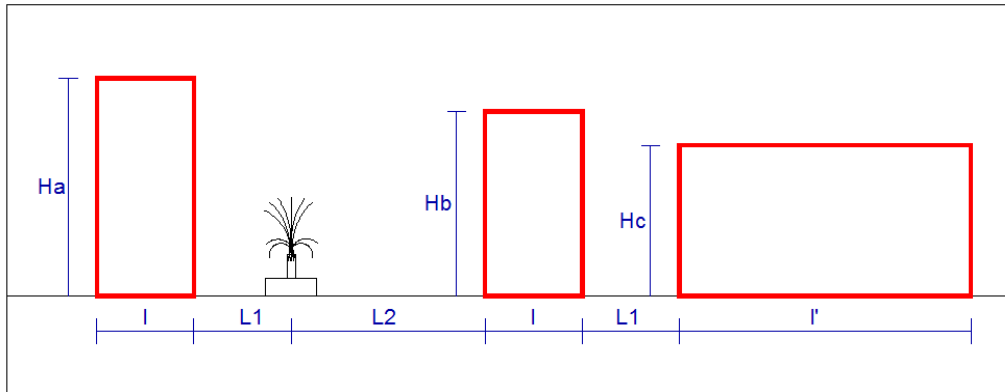


Fig. n° V.11 : vue de face de la scène urbaine (Hauteurs, distances).

Source : Auteur.

*b) Configuration :*

Les bâtiments A et B sont disposés parallèlement à notre source qui est le jet. Alors que le bâtiment C est installé perpendiculairement.

*c) Distance par rapport à la source:*

Trois rapports de distances ont été établis entre la source d'eau et les trois bâtiments. Cette différence de distances, nous permettra aussi de tester l'étendue de l'influence du jet. Nous avons choisi des points de référence au niveau des parois, l'aménagement et l'air.

Comme schématisé sur la [fig. n° V.7], les distances choisies sont régies par des rapports hauteur/ longueur avec  $L2=2L$ ,  $L3= 4L1=2L2$ .

Donc :

- Le **Bâtiment A** est le plus haut, le plus proche du jet d'eau et avec une façade principale exposée au flux direct du jet.

Notre hypothèse concernant ce bâtiment : est qu'il se présente être le plus favorable quant à l'amélioration de la température de ses parois. Il nous permettra aussi de vérifier si l'influence du jet d'eau (caractérisé par la puissance de son jet et le débit d'écoulement) pourrait s'éteindre au point le plus haut du bâtiment.

- Le **Bâtiment B** est moins haut et à une distance 'L2' du jet d'eau avec une façade exposée au flux direct du jet.

L'hypothèse à vérifier pour ce bâtiment, si l'amélioration de température et humidité pourrait atteindre ses parois et sur toute sa hauteur.

- Le **Bâtiment C** est le moins haut, n'a pas de contact direct avec la source d'eau car le bâtiment B constitue un obstacle à l'effet direct du jet.

Cette disposition pourrait nous démontrer l'étendue de l'effet supposé du jet sur la température et l'humidité de l'air. Car même non-exposé directement à la source, le



mouvement des masses d'air chargées de particules d'eau, et dont la température devrait être plus basse que la température de référence, peut apporter une amélioration des valeurs atteignant l'enveloppe du bâtiment.

#### V.1.5 Espace extérieur :

La disposition des bâtiments, régie par les critères cités précédemment, nous a permis de dégager deux zones principales d'espace extérieur.

La première avec la présence du jet d'eau, limitée par les bâtiments A et B. Cette zone pourrait correspondre à une aire de récréation avec des passages piétons.

La deuxième, sans aucun aménagement urbain.

Des mesures de température et humidité dans des points de référence dans chacune des zones, nous enseigneront sur l'influence de la présence d'aménagement urbain - ici le jet d'eau- sur l'amélioration des conditions climatiques de notre canopée urbaine.

#### V.1.6 Le jet d'eau :

Les jets d'eau, contrairement aux fontaines, sont caractérisés par un important débit et puissance. Les caractéristiques de notre jet d'eau, sont définies par le recours au théorème de Bernoulli. L'équation de Bernoulli pour les fluides incompressibles (comme pour notre cas, l'eau) peut être démontrée par intégration des équations d'Euler (voir annexe 02) du mouvement, qui dans les hypothèses du théorème se ramènent à l'équation de Navier-Stokes.

$$\frac{v^2}{2.g} + z + \frac{p}{\rho.g} = \text{constante} \quad \text{Eq (V.10)}$$

p : est la pression en un point (en Pa ou N/m<sup>2</sup>)

ρ : est la masse volumique en un point (en kg/m<sup>3</sup>)

v : est la vitesse du fluide en un point (en ms)

g : est l'accélération de la pesanteur (en N/kg ou m/s<sup>2</sup>)

z : est l'altitude (en m)

Les paramètres de notre jet d'eau sont les suivants :

- Hauteur moyenne qui est de : 7m
- Un débit qui est de :                    litres/ secondes
- Vitesse de sortie de l'eau :
- Une pression :
- Distance radiale entre le canon et la distribution des gouttes d'eau.

- Diamètre du tube d'eau (canon de sortie)

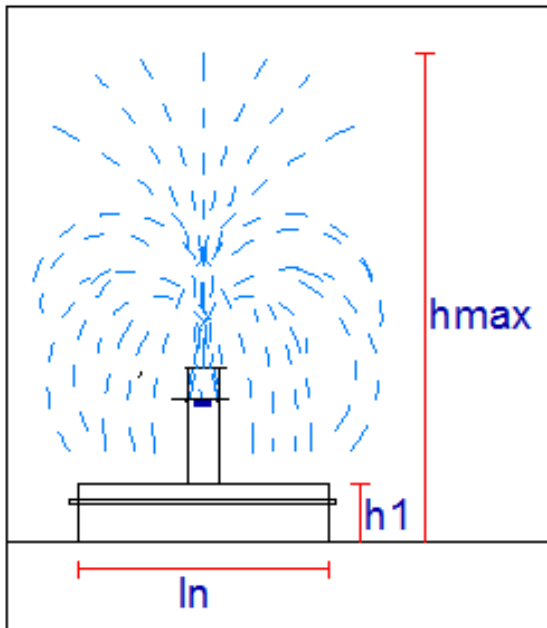


Fig. n° V.12 : Schématisation du jet d'eau  
Source : Auteur.

Les différentes composantes de notre scène ainsi que leurs caractéristiques sont schématisés dans ce qui suit :

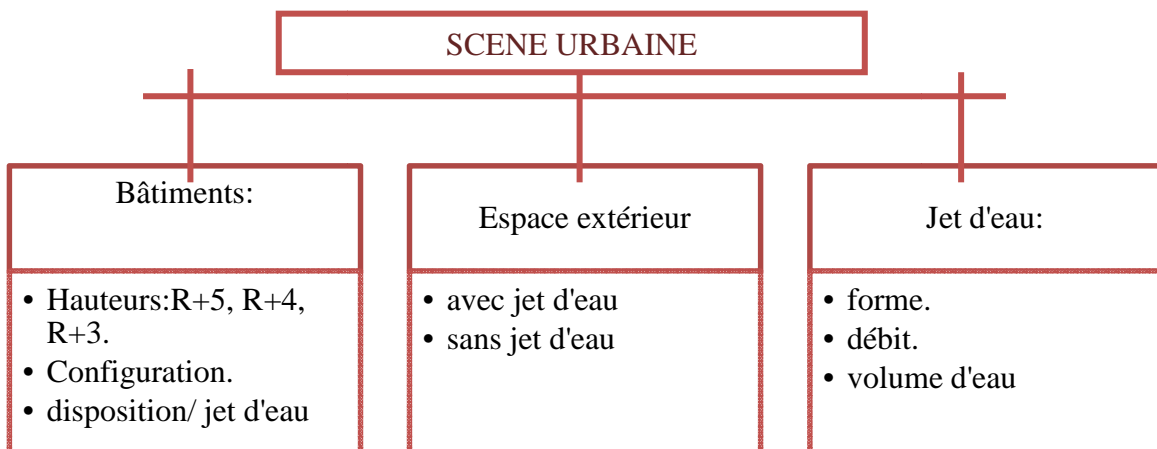


Fig. n° V.13 : Composantes de la scène urbaine. Source : Auteur.

## VI. Etapes de la simulation :

### VI.1 Création de la géométrie :

La première phase consiste à la création de la géométrie de la scène urbaine sur le modelleur “ Gambit” version 2.3.16.

Gambit est un Solver conçu pour aider les concepteurs et analystes à construire des modèles de mailles pour des dynamiques des fluides (CFD) ainsi que d'autres applications scientifiques.

Pou le premier cas, comme pour le deuxième et le troisième, le prototype est dessiné sur Gambit en 3D et 2D respectivement et en respect des dimensions et proportions.

## VI.2 Choix du maillage :

La canopée urbaine est modélisée comme un volume d'air humide. Elle constitue le domaine de simulation. Ce domaine est divisé en volumes de contrôle finis, cette phase constitue la phase de maillage volumique.

Dans notre travail, nous avons opté pour un maillage hybride (triangulaire et quadrangulaire) non-structuré. Ce type de maillage offre plus de précision et flexibilité quant aux objectifs de notre étude. Il est plus raffiné au niveau des bâtiments et à l'interface eau-air.

Le niveau de l'aire d'étude est paramétré par la taille de la scène étudiée et nous supposons qu'au delà de cette hauteur, les valeurs seront constantes.

Le fichier modélisé sur Gambit est un fichier mesh, qui sera exporté vers fluent afin d'entamer les calculs.

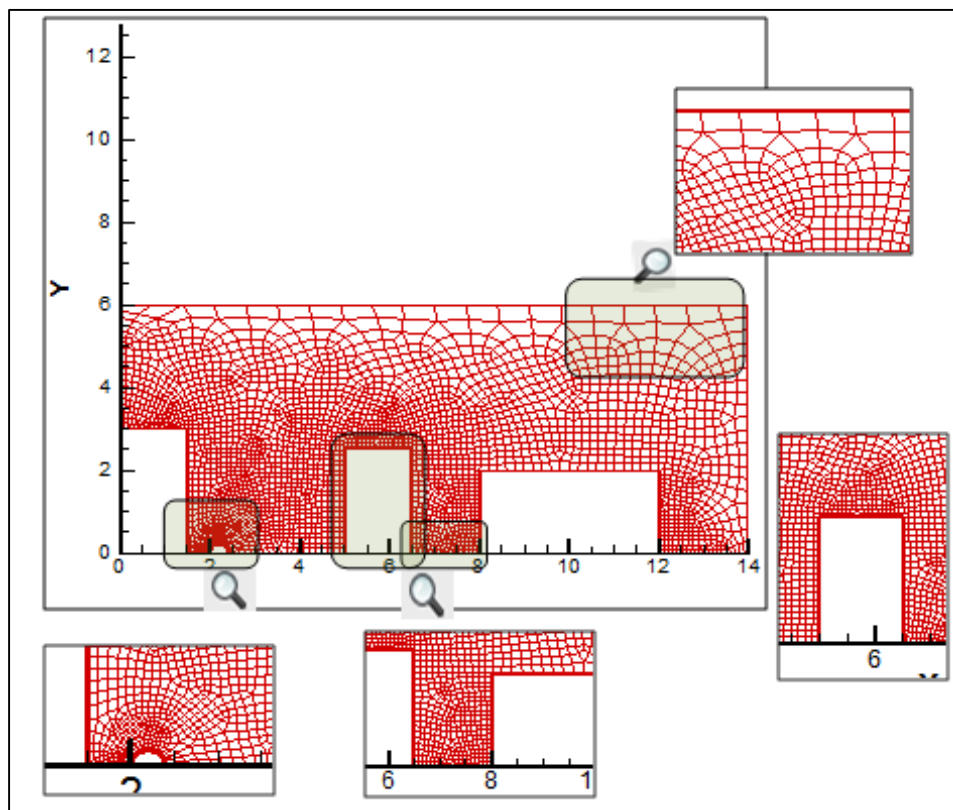


Fig. n° V.14 : Exemple du maillage utilisé. (Type hybride raffiné au niveau des bâtiments et jet d'eau). Source : Auteur.

### **VI.3 Modélisation sur fluent :**

La première phase consiste à fixer les conditions aux limites :

Il s'agit donc de renseigner fluent sur les conditions d'entrée. Leur définition repose sur un choix de climat de référence ; pour notre étude c'est le climat aride de la wilaya de Biskra. Il s'agit de conditions en régime stationnaire.

#### **VI.3.1 Température de référence “ $T_{ref}$ ” :**

Dans le premier cas nous avons opté pour une température ambiante de l'ordre de 24°C, tandis que pour le deuxième et troisième cas, la température de référence (température d'entrée) est égale à la valeur estivale maximale qui est comme nous l'avons déjà vu, observée en mois de juillet et d'une valeur de l'ordre de 38°C.

#### **VI.3.2 Humidité relative de référence “ $H_{ref}$ ” :**

Pour le premier cas, l'humidité relative choisie est de 40%. Pour le deuxième et le troisième cas, l'humidité relative correspond à la valeur minimale en période estivale, qui est de 20% en mois de Juillet

#### **VI.3.3 Vitesse et direction du vent :**

Le régime correspond à un régime stationnaire, la direction des vents correspond à celle des vents dominant chaud ; Nord-est. Avec une vitesse de 4.5 m/s pour le premier cas et de 3 m/s pour le deuxième et le troisième cas.

#### **VI.3.4 Pression atmosphérique :**

La pression atmosphérique d'entrée est fixée à 1atmosphère pour les trois cas.

#### **VI.3.5 Débit et écoulement du jet :**

Ces conditions sont homogènes sur toute la zone et sont égales aux valeurs des conditions météorologiques.

#### **VI.3.6 Conditions sol et enveloppe du bâtiment :**

La condition au limite pour le socle du sol est une condition “Wall”. Les paramètres physique liés aux mouvements respectent la condition d'adhérence et les lois de parois standard [Fluent, 2006]. Le comportement thermo radiatif des sols et parois des bâtiments n'est pas considéré dans notre étude.

## VI.4 Procédure de simulation:

Cette étape concerne, le travail avec le logiciel Fluent. La visualisation des résultats se fait dans Tecplot 360 qui est un outil d'aides aux analystes et concepteur.

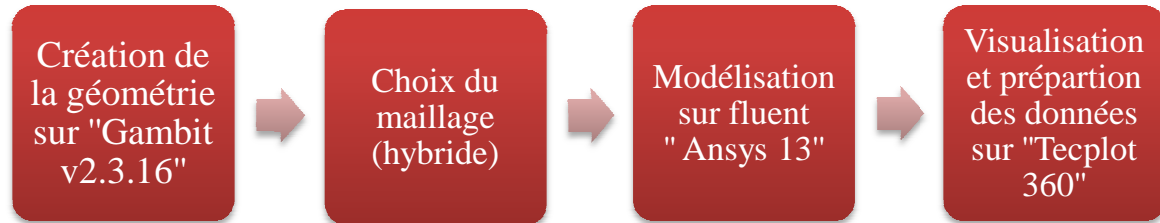


Fig. n° V.15: schématisation des étapes de modélisation. Source : Auteur.

## VII. Etude de cas :

### VII.1 Etude du 1<sup>e</sup> cas :

Cette première composition urbaine nous permettra d'étudier :

- Les variations de température.
- L'humidité relative.
- Le transfert et la disposition des masses chargées d'humidité en présence d'un aménagement d'eau.
- La vitesse d'écoulement de l'air
- La trajectoire d'écoulement de l'air dans une configuration urbaine complexe.

Pour ce faire, nous établirons des coupes sur des plans choisis en réponse à nos objectifs. Les variations de température et humidité relative, seront comparées en tout point de la scène et avec la T et HR d'entrée qui constituent nos valeurs de référence.

Ce qui est de l'écoulement de l'air, des séquences d'animations nous permettrons d'observer le mouvement de l'air chargé de gouttes d'eau et étudier sa trajectoire.

### VII.2 Etude du 2<sup>e</sup> cas :

La deuxième configuration, correspond à un îlot qui regroupe cinq bâtiments de hauteurs rapprochées. L'objectif principal de ce cas d'étude est d'observer les améliorations supposées à la limite du bâtiment, c'est-à-dire les valeurs qui atteignent son enveloppe. On étudiera donc :

- Les valeurs de température de l'air et à la surface des bâtiments, qu'on comparera à la température d'entrée.
- Les variations de l'humidité relative engendrées par la présence du dispositif d'eau et ses zones de concentration. Les taux qui atteignent les enveloppes des bâtiments et l'effet sur le bien-être des individus.
- La vitesse d'écoulement de l'air à l'interface bâtiment.

La température et humidité d'entrée, constitueront ici aussi, nos valeurs de référence, par rapport à les quelles nous pourrions quantifier l'amélioration qui pourrait exister en présence du jet d'eau.

### VII.3 Etude du 3<sup>e</sup> cas :

L'objectif principal de l'étude de ce troisième cas : est de tester l'influence d'une présence d'eau sur les conditions climatiques atteignant les enveloppes des bâtiments qui composent la scène. Ces conditions déterminent en partie majeure, les conditions de confort et bien-être des habitants ainsi que les consommations énergétiques qui en résultent.

Pour se faire, un ensemble de comparaisons sont choisies :

- **1<sup>e</sup> comparaison** : *température, humidité de référence/ température, humidité de l'aménagement.*

Dans cette première comparaison, nous avons choisi de confronter deux données climatiques, la première est la température et l'humidité de référence,  $T_{ref}$  et  $H_{ref}$  qui constituent les conditions aux limites (voir ci-dessus) et qui correspondent aux conditions météorologiques de la wilaya de Biskra. La deuxième est la valeur donnée par simulation.

- a) A un point P1 dans la zone 01, à proximité du jet d'eau.
- b) A un point P2 de la zone 02, loin de la source d'eau.

Le but de cette comparaison est de démontrer l'effet de la présence d'un aménagement d'eau sur la température de l'air ambiant.

- **2<sup>e</sup> comparaison** : *température de l'air / température de l'enveloppe du bâtiment :*

La seconde, fait opposer deux valeurs : température de référence  $T_{ref}$  à des températures mesurées à des points de l'enveloppe des trois bâtiments.

- **3<sup>e</sup> comparaison** : *entre les trois bâtiments*

Cette comparaison, à pour but de démontrer l'étendue des effets d'une présence d'eau en comparant les températures à des points différents des enveloppes des trois bâtiments disposés comme nous l'avons déjà présenté ci-dessus.

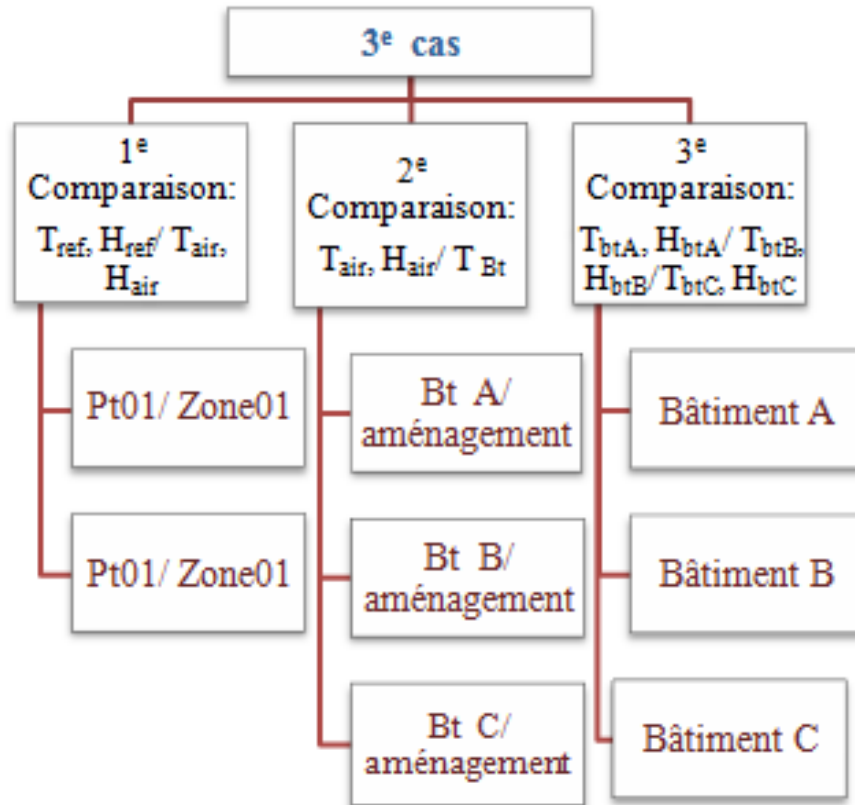


Fig. n° V.16 : scénarios de comparaison "3<sup>e</sup> cas". Source : Auteur.

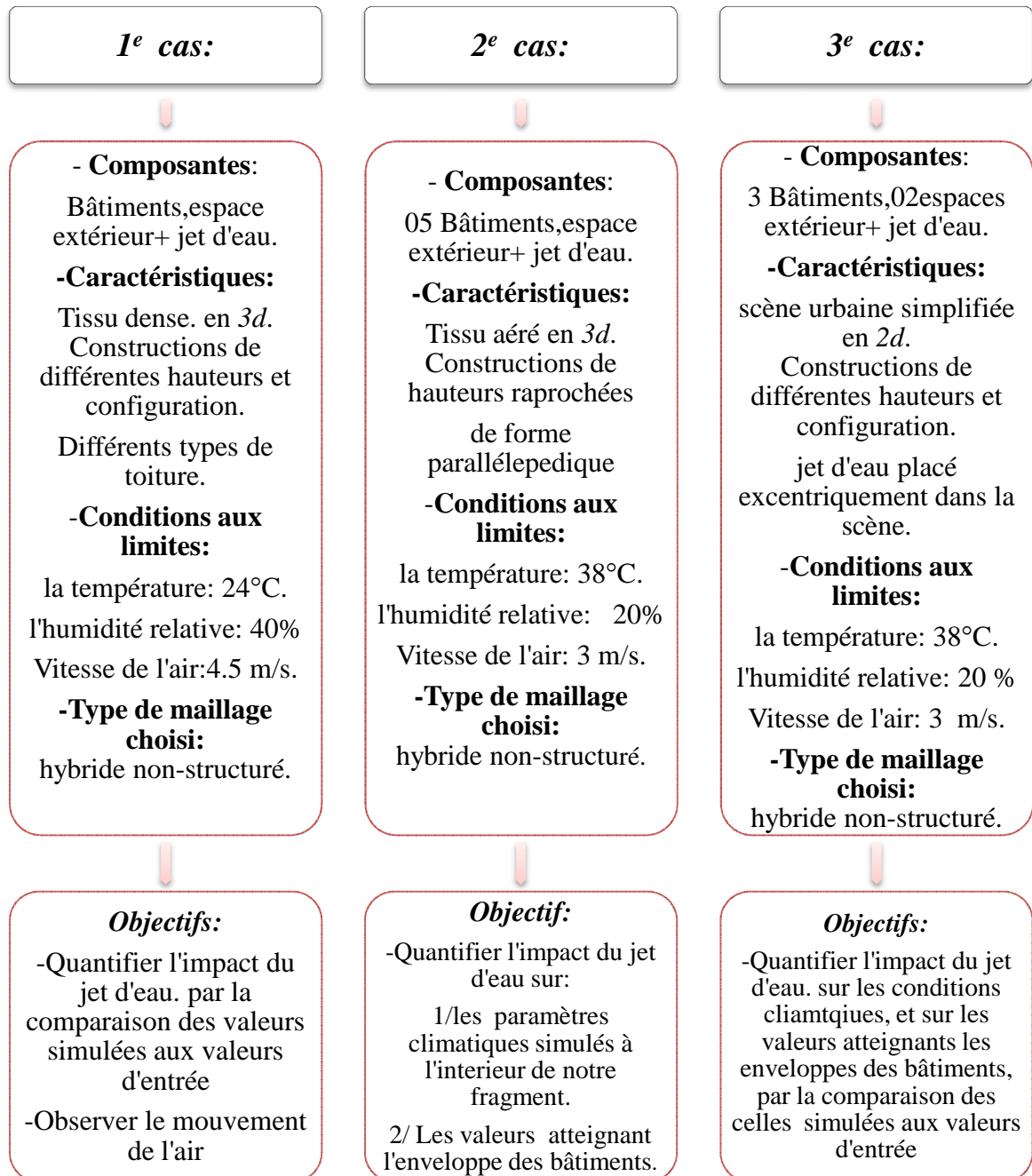


Fig. n° V.17: récapitulatif des cas d'études  
Source : Auteur.



## **Conclusion :**

Le climat de la wilaya de Biskra, constitue un terrain favorable pour l'expérimentation de notre hypothèse principale qui concerne l'évaluation de rôle régulateur du microclimat que pourrait accomplir la présence d'un dispositif d'eau. L'examen des données climatiques, nous a confirmé le caractère sec et chaud de Biskra.

Le recours à la simulation s'était présenté, comme la meilleure solution dans notre cas, d'une part par la flexibilité qu'offrent les outils numériques et la possibilité de contrôler les données. Et d'autre part par sa faisabilité, vu le manque voir même l'absence de ce type de dispositifs dans nos milieux urbains.

Le code CFD, fluent est basé sur le principe d'équations différentielle Navier et Stokes, que nous avons détaillés dans le présent chapitre. La simulation s'est faite sur trois étapes principales : création et maillage de la géométrie sur Gambit, interface modeleur de Fluent. Par la suite une modélisation dans fluent avec la fixation des conditions aux limites, nous a permis d'avoir un ensemble de résultats qui seront traités sur Tecplot360, outil d'aide pour les analystes et concepteurs.

Nous avons composé ainsi, trois scènes urbaines qui regroupent un ensemble de critères nécessaires à notre étude, à savoir : différentes hauteurs de bâtiments, configurations, et disposition par rapport à notre dispositif de référence. Ce dernier est un jet d'eau de débit régulier, placé à l'intérieur de nos scènes.

Le premier cas est une scène complexe en 3D, qui regroupe un ensemble de bâtiments de configurations et hauteurs différentes. L'objectif principal de cette configuration, en plus de l'étude des variations climatiques est d'observer les mouvements d'air. Les conditions d'entrée pour cette modélisation correspondent aux valeurs moyennes annuelles.

Dans le deuxième et le troisième cas, la température et l'humidité relative qui constituent les conditions aux limites, sont les valeurs observées le mois de juillet. A travers ces deux cas, nous approchons le bâtiment, par les valeurs des paramètres climatiques atteignant son enveloppe.

Afin de pouvoir répondre aux objectifs de l'étude, nous considérons toutes les autres variables comme constantes et homogènes à travers toute la canopée.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes simulations effectuées, et analyser les résultats obtenus, pour répondre à nos hypothèses de départ.

# **CHAPITRE VI:**

**INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

## **Introduction :**

Lorsqu'on s'intéresse au confort des usagers, l'échelle considérée est celle de son environnement proche : la rue, la place, ... et le bâtiment. Un des leviers d'intervention, consiste à agir sur le contexte climatique, afin de réduire les sollicitations thermiques d'été, solution qui présente un caractère équitable et sanitaire.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'effet que peut produire la présence de dispositifs d'aménagement d'eau sur les conditions climatiques locales, à savoir : la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Ces paramètres se trouvent cependant, en continue interaction les uns avec les autres.

Le présent chapitre, traite des résultats obtenus après modélisation des trois scènes urbaines présentées précédemment, par le code CFD 'Fluent'. Nous allons essayer de comprendre et interpréter ces résultats, en réponse à nos objectifs et hypothèses de départ.

Mais avant ça, nous avons jugé nécessaire de rappeler les interactions qui existent entre les différents paramètres climatiques. Ce rappel a pour objectif de faciliter la compréhension de ces résultats obtenus par nos simulations.

*Rappel :*

A l'échelle microclimatique, on ne parle pas de changement de climat mais plutôt de variations de valeurs des paramètres climatiques : température et humidité relative de l'air, la pression atmosphérique et mouvement de l'air. Ces paramètres sont influents et influencés à la fois. Leurs valeurs, conditionnent d'une manière considérable, le bien-être des individus et par conséquent la consommation d'énergie. Mais aussi, les composantes du fragment urbain et leurs caractéristiques (matériaux, densité, configuration, les consommations énergétiques, etc.) modifient ces paramètres et peuvent entraîner de graves problèmes. (Voir chapitre IV).

La température de l'air, agit sur plusieurs fronts à la fois :

- La différence de températures entre deux zones, implique une variation de pressions.
  - Cette variation de pressions, provoque à son tour un mouvement d'air des zones à hautes pressions, vers celles à basse pression.
- L'humidité relative, aussi, dépend de la température de l'air, elle augmente si cette dernière baisse et diminue si elle s'élève.
- C'est par le mouvement des molécules d'eau que débute l'évaporation. A l'intérieur d'une masse d'eau liquide, les molécules vibrent et circulent de manière désordonnée et ce mouvement est lié à la température : plus elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et d'entrer dans l'atmosphère.

## **I. Analyse et interprétation des résultats :**

D'un point à l'autre d'un espace micro climatologique donné, la plupart des éléments météorologiques (précipitations, nébulosité, etc.) ne se modifient pas du fait que leurs rythmes de variation s'inscrivent à l'intérieur d'une échelle plus grande. La valeur de ces variables sera identique en tout point situé à l'intérieur des limites du micromilieu. Il n'en est pas de même pour les autres paramètres qui au contraire des précédents, sont sujets à une forte variabilité spatiale- même à cette échelle microclimatique- il s'agit notamment de la température, l'humidité relative, des caractères du vent (force et direction) c'est sur ces paramètres que portent généralement les études micro climatologiques et c'est sur eux que se basera notre analyse. Nous avons donc choisi d'analyser les variations de température et

l'humidité relative que peut provoquer la présence d'eau au milieu de notre fragment d'étude.

Nous considérons que nos paramètres d'entrée, sont homogènes en tout point de la canopée.

## I.1 Interprétation des résultats du 1<sup>e</sup> cas :

### I.1.1 La température :

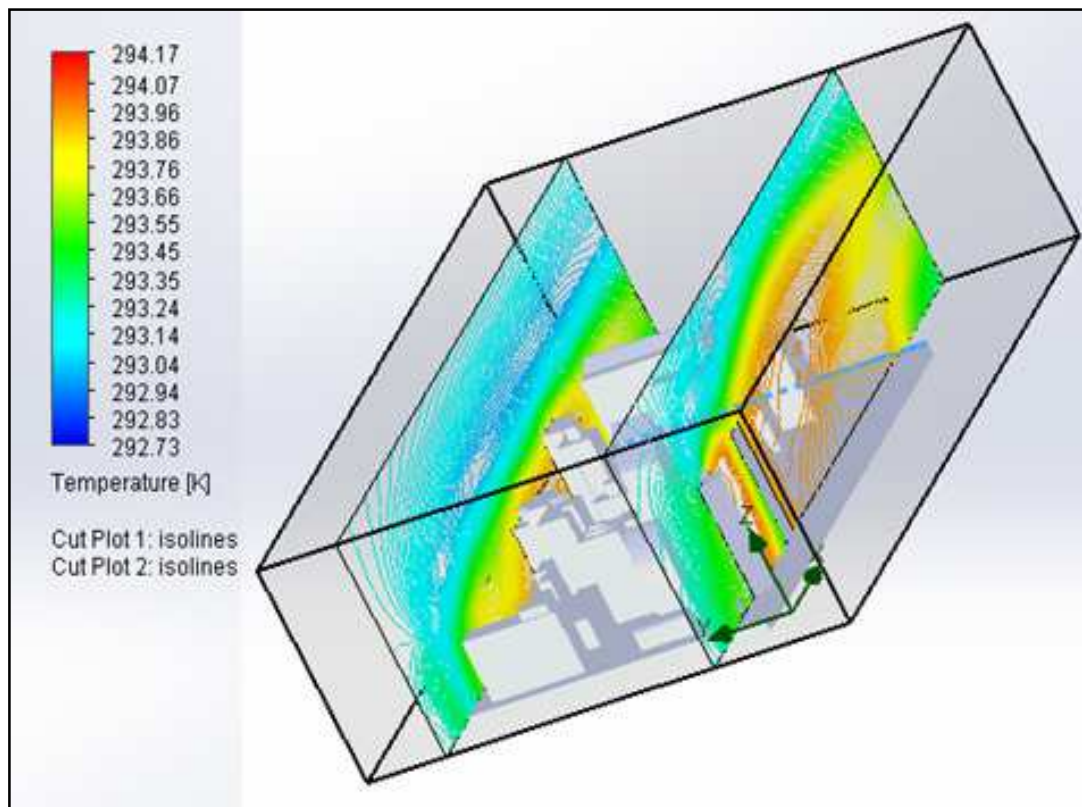


Fig. n° VI.I : Valeurs de températures aux frontières de la canopée (1<sup>e</sup> cas)

Source : Auteur

La présente figure, nous donnent les résultats des valeurs de températures enregistrées au niveau de notre canopée. On a effectué deux coupes, aux frontières de notre fragment. Et qui correspondent d'une part aux points les plus éloignés du jet d'eau, qui est situé au centre de notre scène. Et d'autre part, on pourrait observer les variations au niveau des façades de bâtiments.

La température de référence et à laquelle nous comparons nos résultats, est de 24°C. Cette valeur constitue notre condition d'entrée.

Les valeurs de températures simulées varient entre 293.14 K (soit 19.99°C) et 294.17 K (soit 21,02 °C). Les plus élevées sont enregistrées près du sol et bâtiments, tandis que les valeurs les moins élevées se trouvent au-delà du niveau des bâtiments.

Nous observons ainsi :

- Des valeurs de température inférieures à la température de référence.
- Une concentration des valeurs les plus élevées dans les parties proches du sol, tandis que des valeurs moindres sont enregistrées en hauteur.
- Les températures enregistrées au niveau des enveloppes des bâtiments varient entre 293.96 K (soit 20.81°C) et 293.66 K (soit 20.51°C), les étages inférieurs et qui sont situés à l'intérieur du fragment sont les plus défavorisés.

Il est à rappeler que toutes les autres variantes climatiques sont considérées comme homogènes et constantes.

Pour expliquer les résultats obtenus nous aurons recours à deux phénomènes : le premier est le processus d'évaporation et le deuxième concerne les interactions température pression et le mouvement de l'air :

- En comparant les valeurs obtenues avec notre température d'entrée, nous remarquons un abaissement d'une moyenne de 3°C. Cette réduction, est due à la présence du jet d'eau, L'eau s'évapore et rafraichit. Ce changement de phase d'un état liquide à un état de vapeur nécessite une part importante d'énergie (appelée chaleur latente de vaporisation) qui estimée par des études à 2450 KJ par 1Kg d'eau évaporée (équivalent à une épaisseur de 1mm d'eau par 1m<sup>2</sup> de surface).

Ainsi une part importante des apports énergétiques est perdue sous forme de chaleur latente, ce qui provoque un abaissement de la température de l'eau. Ensuite le flux de chaleur sensible tend à équilibrer l'écart de température entre la surface de l'eau et l'air. C'est ce mécanisme qui provoque un rafraichissement de l'air, et qui a conduit à cet abaissement de température.

- D'un autre côté, la distribution des valeurs de température, comme il apparait sur la figure (VI.1) peut s'expliquer par le fait qu'au niveau du sol, et entre les bâtiments, la chaleur s'accumule de façon importante. Aussi, nous supposons que l'air est moins humide à ce niveau, chose qu'on vérifiera ci-dessous (Fig. n° VI. 2)

La température de l'air au-delà des bâtiments est moins élevée, l'air est peut être à ce niveau plus humide (plus chargé de gouttes d'eau) ce qui fait que sa température baisse.

- La réduction des valeurs de température qui touche l'interface des bâtiments varient entre 2.19-3.49 °C. Une importante réduction qui pourrait améliorer les conditions de confort internes.

### I.1.2 Humidité relative :

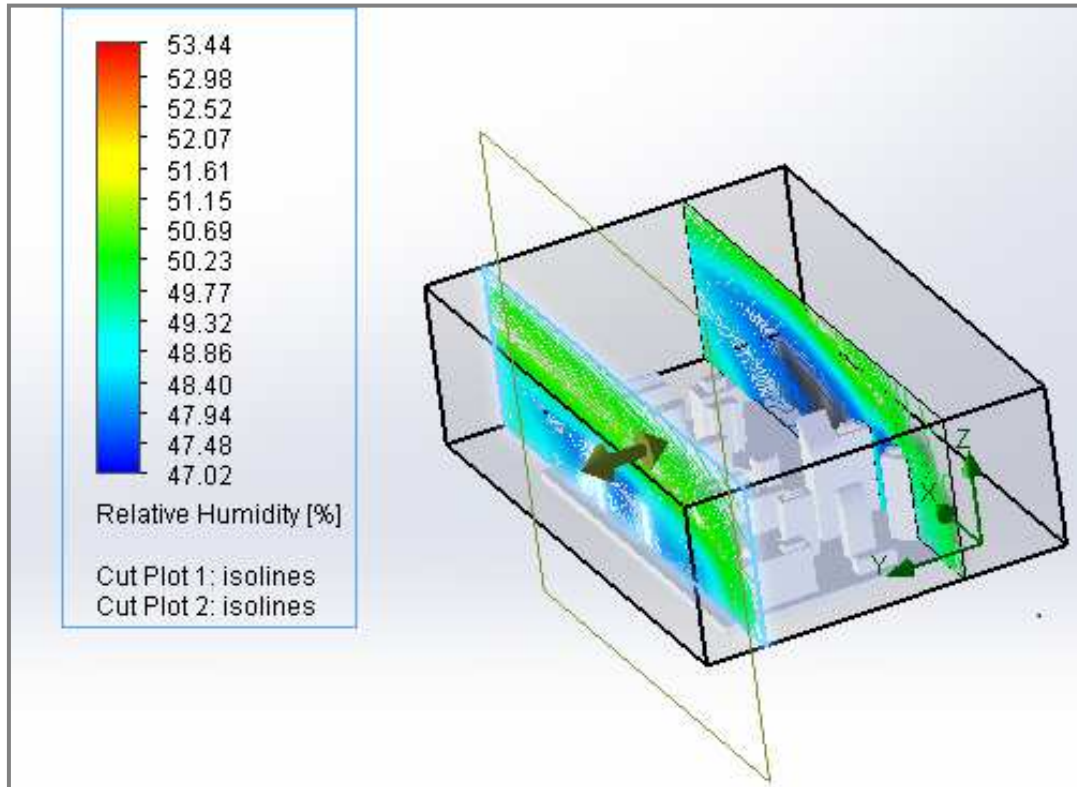


Fig. n° VI.2 : Valeurs de l'humidité relative aux frontières de la canopée. (1° cas)

Source : Auteur

La figure (VI.2) présente, des valeurs d'humidité relative, aux limites de notre canopée. Les coupes correspondent aux plans perpendiculaires au dispositif d'eau, et qui sont aussi, les façades de nos bâtiments.

Il s'agit d'une suite de courbes qui tracent chacune à son tour les variations de valeurs de l'humidité relative horizontalement. Le dégradé de couleurs, représente les variations de valeurs de l'humidité relative.

Nous remarquons, la dominance de deux couleurs, le bleu et le vert, qui correspondent à des valeurs d'humidité variant entre 47 % et 50%.

Le plus grand pourcentage est enregistré au-delà des bâtiments pour descendre graduellement jusqu'au niveau bas des bâtiments où l'humidité relative est d'une valeur de 47%.

Pour résumer :

- Les valeurs d'humidité relative enregistrées, varient entre 47 et 50%.
- Contrairement à la température, les valeurs de l'humidité sont plus élevées dans les hauteurs et moindre au niveau du sol.

Comme nous l'avons déjà vu dans le 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> chapitre, l'humidité relative est un rapport- à une température donnée- entre la quantité d'eau que contient l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir avant de passer à la saturation. Le pourcentage élevé de l'humidité à la limite verticale de la canopée, démontre que l'air à ce niveau est plus chargé de gouttes d'eau, donc a tendance à s'élever (par convection naturelle, voir plus bas) laissant place à un air moins chargé.

D'autre part, on sait que l'humidité relative dépend de la température de l'air, elle augmente si cette dernière baisse et diminue si elle s'élève, en extrapolant les deux figures (VI.1 et VI.2) nous pouvons voir que c'était réellement le cas.

Le taux d'humidité au niveau des bâtiments est un peu plus faible, cela est principalement dû à une température élevée à l'intérieur de l'urbain, à cause de la présence de bâtiment, surface minéralisées...

Il est à rappeler que l'humidité relative d'entrée est de 40%, cette valeur correspond à une valeur moyenne du climat de Biskra.

Nous observons donc, une nette amélioration de l'humidité relative et qui est d'une moyenne de **8.5%**.

Nous savons aussi, que l'air est sec si l'humidité relative est inférieure à 35%, moyennement humide avec un taux compris entre 35et 65%et humide à plus de 65%.

Les valeurs enregistrées dans notre cas, n'atteignent pas le niveau d'inconfort qui peut être ressenti que ce soit en un climat sec (important taux de sudation) ni en climat humide (ou il y aurait saturation).

### **I.1.3 Ecoulement de l'air :**

L'écoulement de l'air, est en général, conditionné par deux facteurs :

- Les gradients de température : pour un fluide en écoulement, des gradients de températures décroissants avec l'altitude provoquent des mouvements ascensionnels de matière (convection naturelle). Qui ont pour objectif, d'homogénéiser la température. Ces mouvements ne peuvent s'expliquer sans considérer des variations de masses volumiques
- Les variations de masses volumiques : en cas de fluide compressible, comme dans notre cas ' vapeur d'eau' ; la masse volumique dépend de la pression ou de la température. La vitesse d'écoulement comme nous a démontré l'équation de conservation



de masse de Navier-stokes (voir chapitre V, Eq (V.I)), dépend de la valeur de masse ajoutée  $S_m$  qui prend une valeur positive dans notre cas (phénomène d'évaporation).

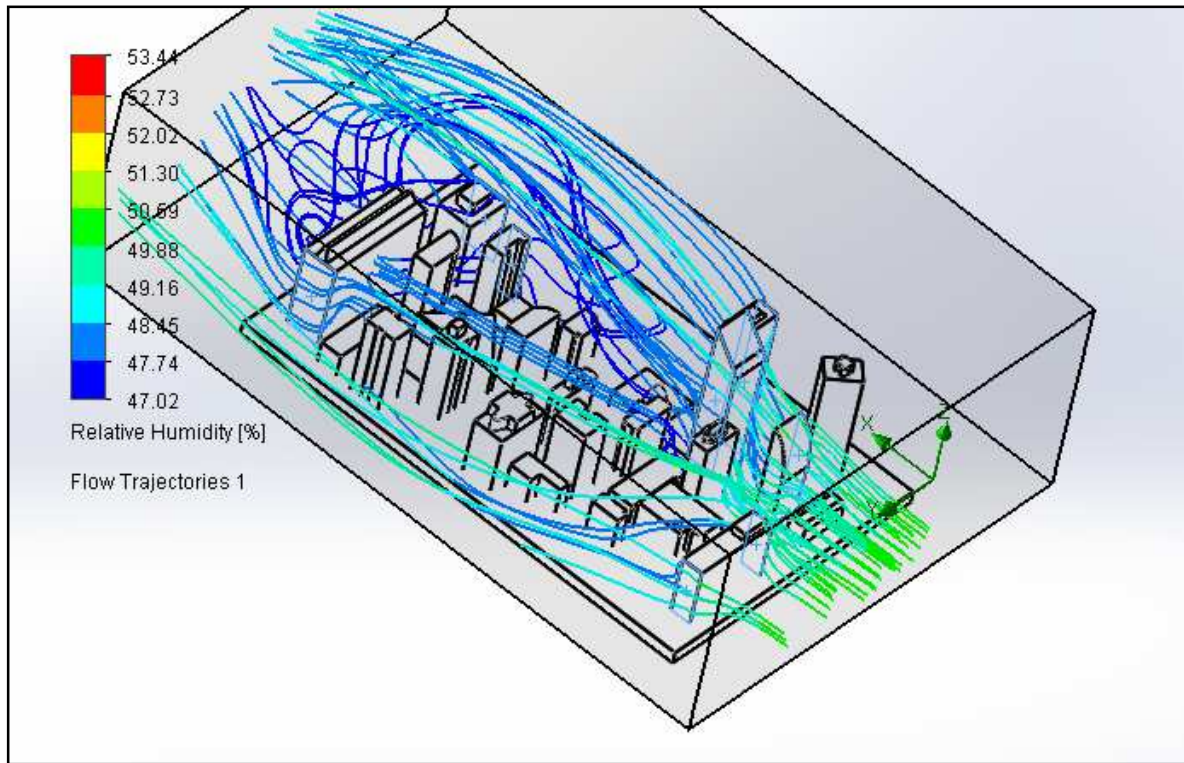


Fig. n° VI.3 : Trajectoires d'écoulement de l'air (1<sup>er</sup> cas)  
Source : Auteur

La figure (VI.3), nous démontre les trajectoires d'écoulement de l'air chargé de particules d'eau évaporées.

Nous observons que :

- L'écoulement est plutôt régulier aux frontières de notre canopée
- A l'intérieur du fragment, l'écoulement de l'air est perturbé. Sa trajectoire se modifie d'un point à un autre. Donnant naissance à de petites turbulences. (voir, fig.VI.4).
- Les valeurs de l'humidité relative sont moins élevées à l'intérieur de l'urbain.

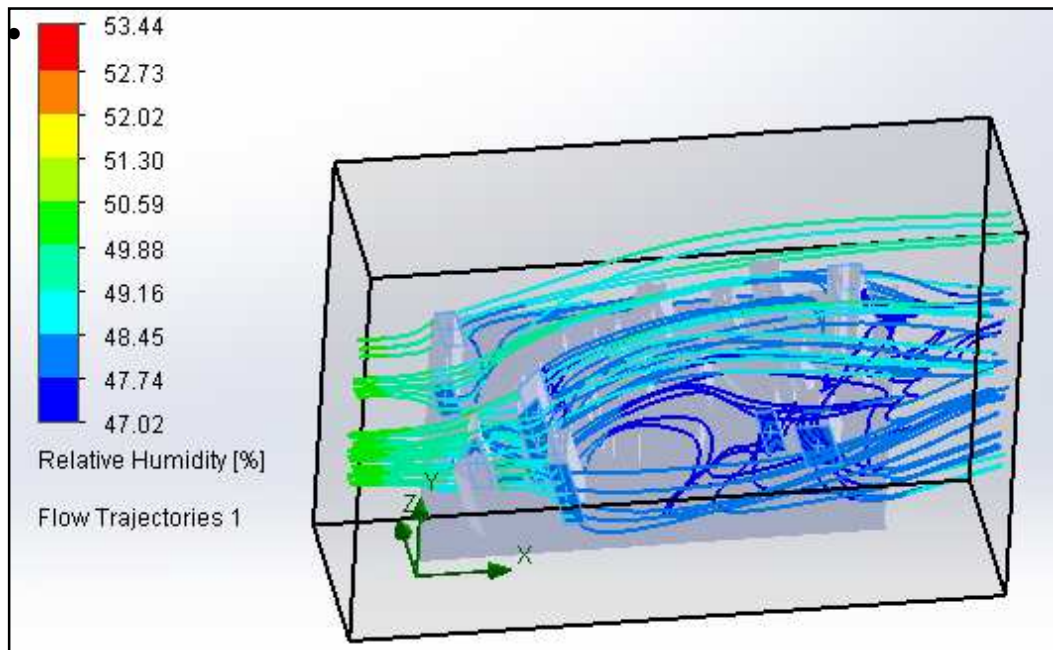


Fig. n° VI.4 : Trajectoires d'écoulement de l'air (1° cas)

Source : Auteur

La déformation de l'écoulement de l'air au niveau de la canopée est une conséquence directe de la rugosité des composantes du fragment urbain. Les bâtiments constituent un obstacle qui modifie la trajectoire de l'air et le contraint à s'élever ou changer de direction pour le contourner.

Le type des toitures, la forme et la hauteur du bâtiment ainsi que leurs dispositions, sont les principaux critères qui régissent l'écoulement de l'air en milieu urbain.

Les faibles taux d'humidité à l'intérieur du fragment, correspondent à des températures élevées (fig. n° VI. 1).

Le caractère turbulent d'un écoulement, est défini par les deux nombres : Reynolds et Rayleigh. Lorsque le rapport de ces deux facteurs est supérieur à une valeur critique, le régime d'écoulement est alors turbulent.

Les paramètres qui définissent le nombre de Reynolds sont : la viscosité cinématique du fluide, la longueur caractéristique de l'écoulement et la vitesse moyenne du vent. Une variation de ces paramètres ou d'un seul entre eux, peut modifier le caractère de l'écoulement.

La concentration des masses d'air chargée en eau est ainsi tributaire d'un ensemble de paramètres qu'il faut prendre en compte, en pensant l'installation des dispositifs d'aménagement d'eau.

## I.2 Interprétation des résultats du 2<sup>e</sup> cas :

### I.2.1 La température :

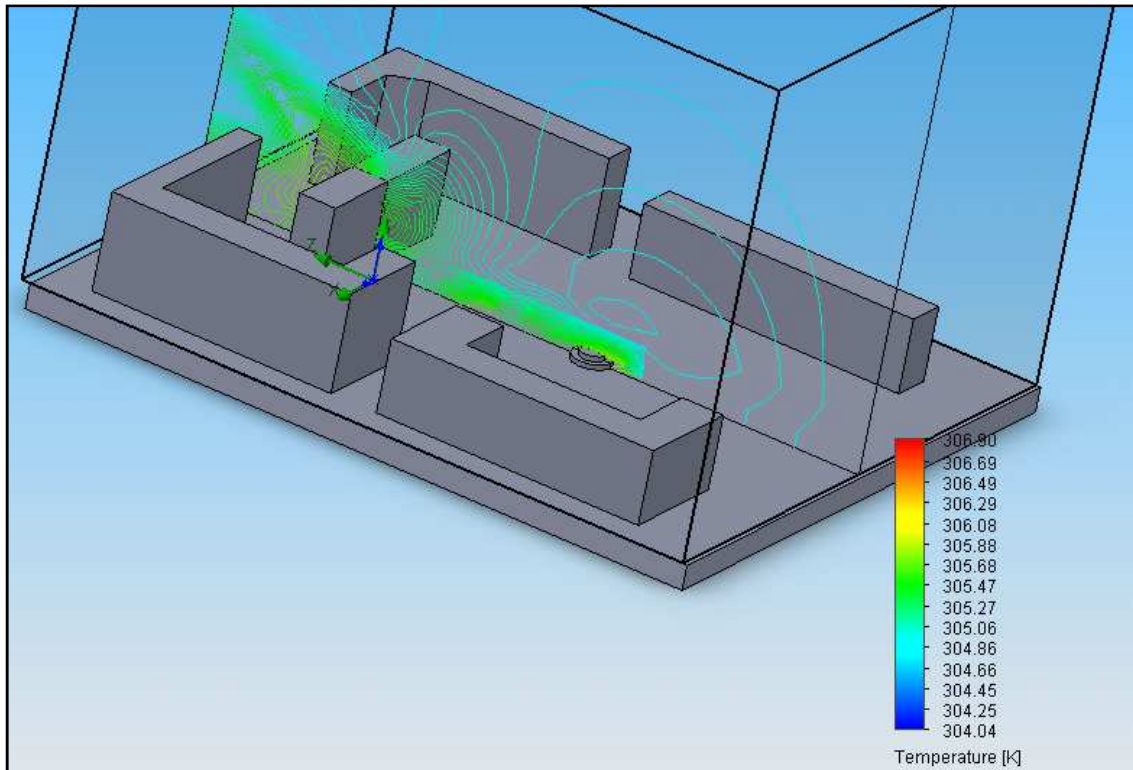


Fig. n° VI.5 : Valeurs de la température au sein du fragment urbain (2<sup>e</sup> cas)

Source : Auteur

La température d'entrée pour ce 2<sup>e</sup> cas est de 38°C, cette valeur approche les maximales enregistrées en mois de juillet dans la ville de Biskra. A une telle température, l'utilisation des systèmes de climatisation active s'accroît, et la consommation d'énergie s'amplifie.

Dans le présent cas, nous nous intéresserons aux valeurs de la température atteignant les façades. Le bâtiment B est l'échantillon choisi pour ce but.

La figure (VI.5) présente les variations de température, la coupe est réalisée au centre de la scène. Nous obtiendrons ainsi, les valeurs au niveau du jet d'eau et du bâtiment choisi.

L'analyse de la présente figure nous démontre que :

- Les valeurs de température obtenues par simulation varient entre 304.86K (soit 31.71°C) et 305.88K (soit 32.73°C).
- La distribution de ces valeurs est plutôt homogène, on observe uniquement deux domaines à une différence de température de 1°C.
- La température qui atteint les surfaces du bâtiment est égale à la valeur la plus élevée qui est de 305.88 K (32.73°C). Elle est homogène sur toute l'enveloppe.

- En comparant les résultats obtenus avec la température d'entrée, nous remarquons une baisse des valeurs enregistrées d'une moyenne de 5°C. Cette baisse considérable, est due à la présence du jet d'eau. Par le processus d'évaporation, l'eau soutire à l'environnement une quantité importante d'énergie ce qui entraîne une réduction de la température.

- Le fragment étudié dans ce 2<sup>e</sup> cas est caractérisé par cet espace central dégagé, à ce niveau il n'y a pas de cumul ni concentration de chaleur dans des parties contrairement à d'autres et c'est ce qui explique, l'homogénéité des valeurs de la température.

- la nouvelle valeur de température enregistrée à l'enveloppe du bâtiment, est ainsi conséquence des améliorations apportées à la température de l'air par la présence de l'eau. Ces nouvelles valeurs sont supposées réduire les consommations d'énergie au niveau des bâtiments.

### I.2.2 L'humidité relative :

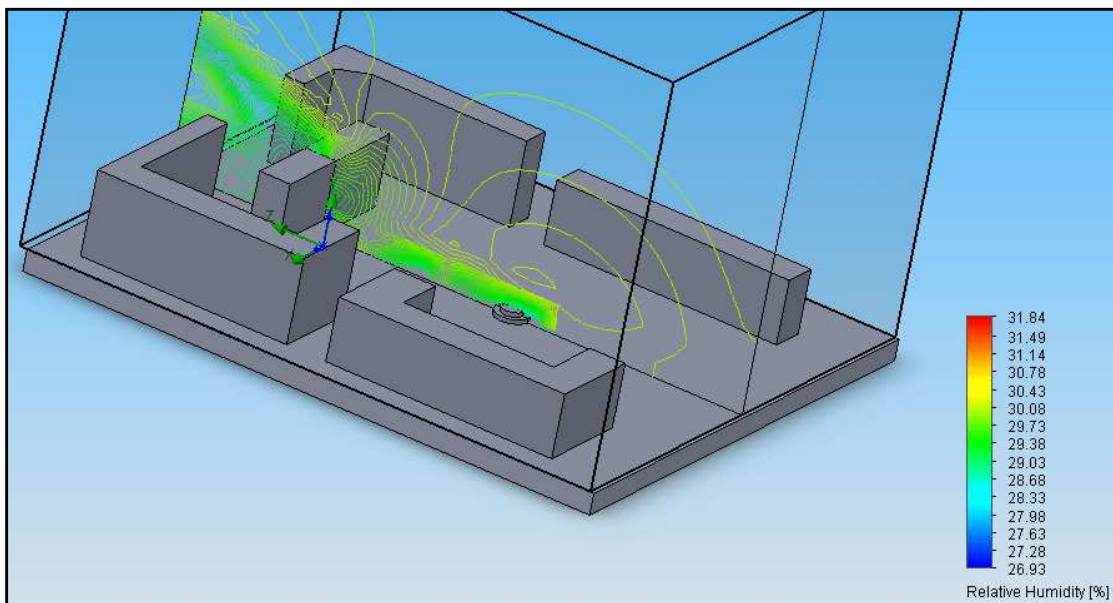


Fig. n° VI.6 : Taux d'humidité relative au sein du fragment urbain (2<sup>e</sup> cas)  
Source : Auteur

Les résultats que nous démontre, la figure (VI.6), sont les valeurs de l'humidité relative simulées sur le plan axial de la scène :

- Ces taux varient entre 29.03 % au niveau bas du fragment et 30.20% en hauteur.
- Ces valeurs sont plutôt homogènes tout au long du plan de coupe.

- Au niveau du bâtiment, le profil des courbes de l'humidité relative se modifie et on enregistre des taux qui varient entre 29.73%, sur la façade qui fait face au jet d'eau, et 29.38 % à la façade arrière.

Notre humidité relative d'entrée est égale à 20%. La comparaison avec les valeurs simulées, nous démontre une amélioration d'une moyenne **9,5%**. Cette amélioration considérable correspond un abaissement de la température et un air plus humide. Cependant, l'air avec de pareils taux d'humidité reste sec.

### I.2.3 Vitesse d'écoulement de l'air :

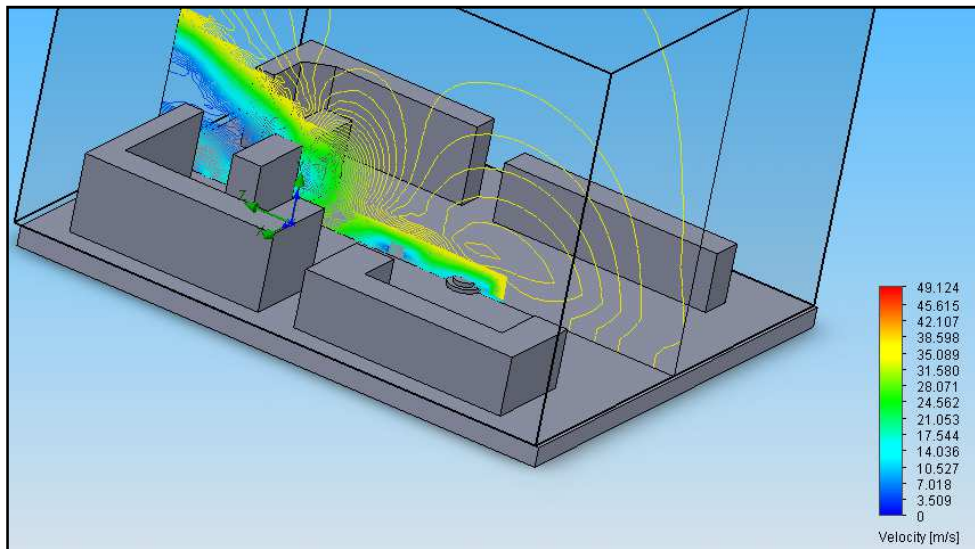


Fig. n° VI.7: La vitesse de l'air au sein du fragment urbain (2<sup>e</sup> cas)

Source : Auteur

L'air se déplace des zones, à hautes pressions à celles à basses pressions. Comme nous l'avons rappelé au début du chapitre, la pression de l'air est en continuelle interaction avec la température de l'air. Des différences de cette dernière, provoquent des variations de pressions, ce qui donne naissance à des mouvements de l'air.

La présente simulation, nous renseigne sur les vitesses d'écoulement de l'air sur le plan central de la scène.

On observe :

- Les vitesses de l'air s'amplifient, en montant en hauteur.
- Les valeurs simulées varient entre 10.52 m/s et 35 m/s.
- Le profil général d'écoulement, a la même allure que ceux de l'humidité et la température. en les comparants, on remarque que les valeurs réduites d'écoulement de

l'air correspondent à de basses valeurs d'humidité. La température à ce niveau est plus importante.

- Au niveau de l'enveloppe du bâtiment, la vitesse d'écoulement est de l'ordre de 22m/s.

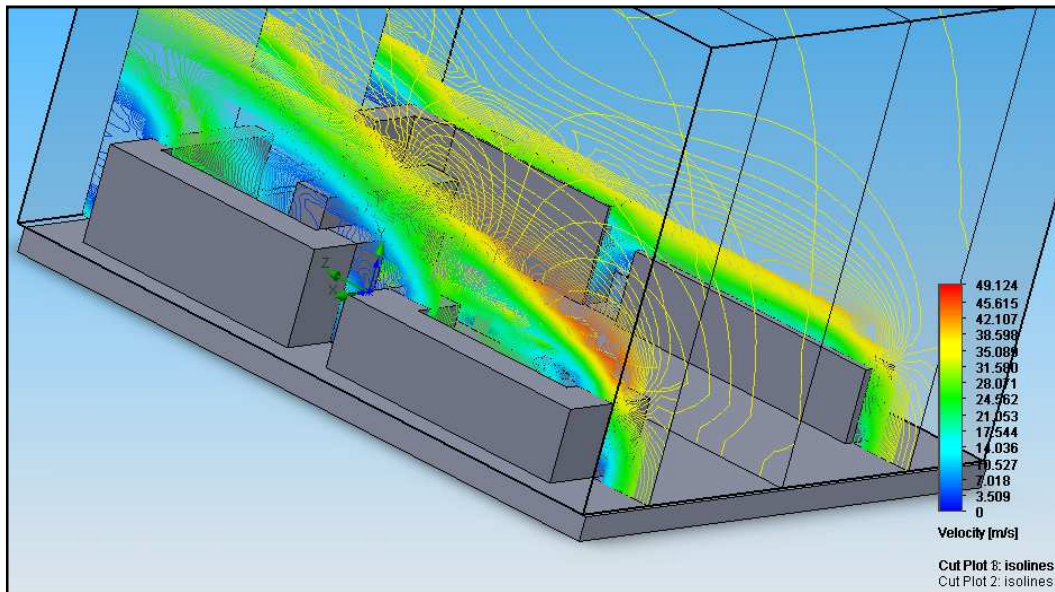


Fig. n° VI.8: La vitesse de l'air (2° cas)  
Source : Auteur

### I.3 Interprétation des résultats du 3<sup>e</sup> cas :

#### I.3.1 vitesse de l'air :

L'écoulement de l'air constitue un paramètre important à prendre en compte lors de la conception énergétique. Son influence est à la fois associée aux échanges convectifs à la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment et au flux thermique généré par le renouvellement d'air des espaces intérieurs. Les variables climatiques les plus importantes liées aux conditions de vent sont la vitesse d'air et le coefficient de convection. Ces deux grandeurs peuvent être considérées comme liées, beaucoup d'auteurs cherchent à les corréler directement en particulier en thermique du bâtiment [Vinet. J, 2000].

Le terme est employé pour indiquer des déplacements horizontaux de l'air, les mouvements verticaux sont des courants. L'air se déplace d'une zone à haute pression vers une autre à haute pression.

La valeur la plus importante d'écoulement dans notre scène est enregistrée au niveau du jet. Plus on s'en éloigne l'air devient plus calme, et le mouvement est réduit pour atteindre ses valeurs minimales entre les bâtiments B et C.

Cette différence s'explique par le fait qu'au contact des particules d'eau en mouvement, provenant du jet, l'activité des différents gaz qui constitue l'air s'accroît. Une petite turbulence se produit provoquant ainsi une augmentation de la vitesse du vent.

Nous pouvons le voir plus clairement, dans la fig. (VI. 11) :

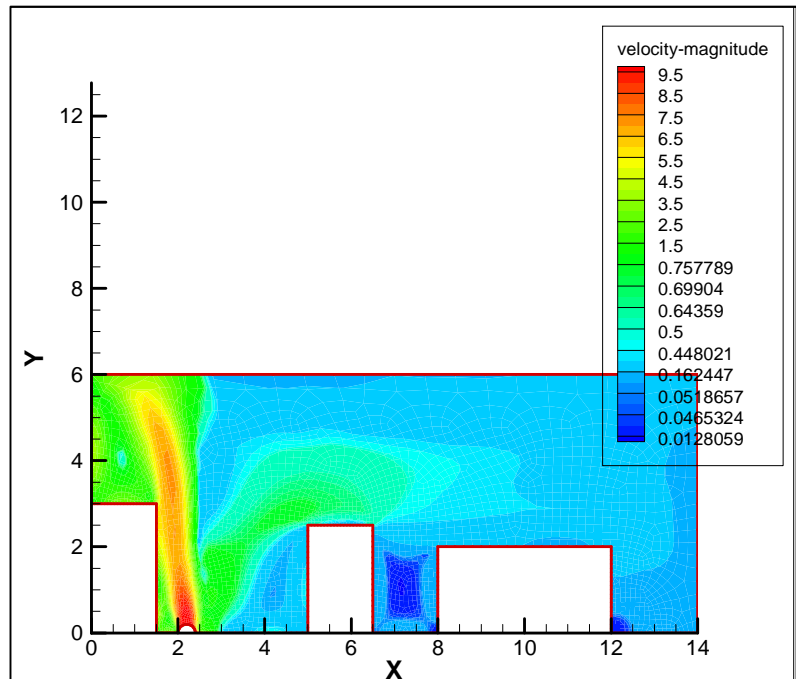


Fig. n° VI.9 : La vitesse du vent (3<sup>e</sup> cas)  
Source : Auteur.

L'orientation et la forme du bâtiment peuvent contribuer à la création d'écoulements favorisant une bonne gestion énergétique. Tout comme ils peuvent modifier leurs trajectoires en constituant des obstacles.

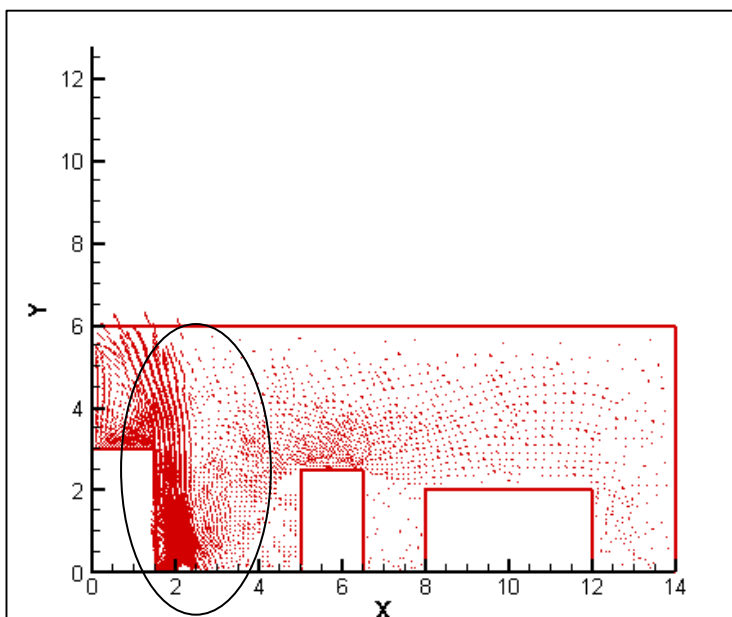


Fig. n° VI.10 : Mouvement de l'air (3<sup>e</sup> cas). Source : Auteur.

Les valeurs simulées en espace extérieur (zone 01) à des hauteurs différentes, sont présentées dans le graphe suivant :

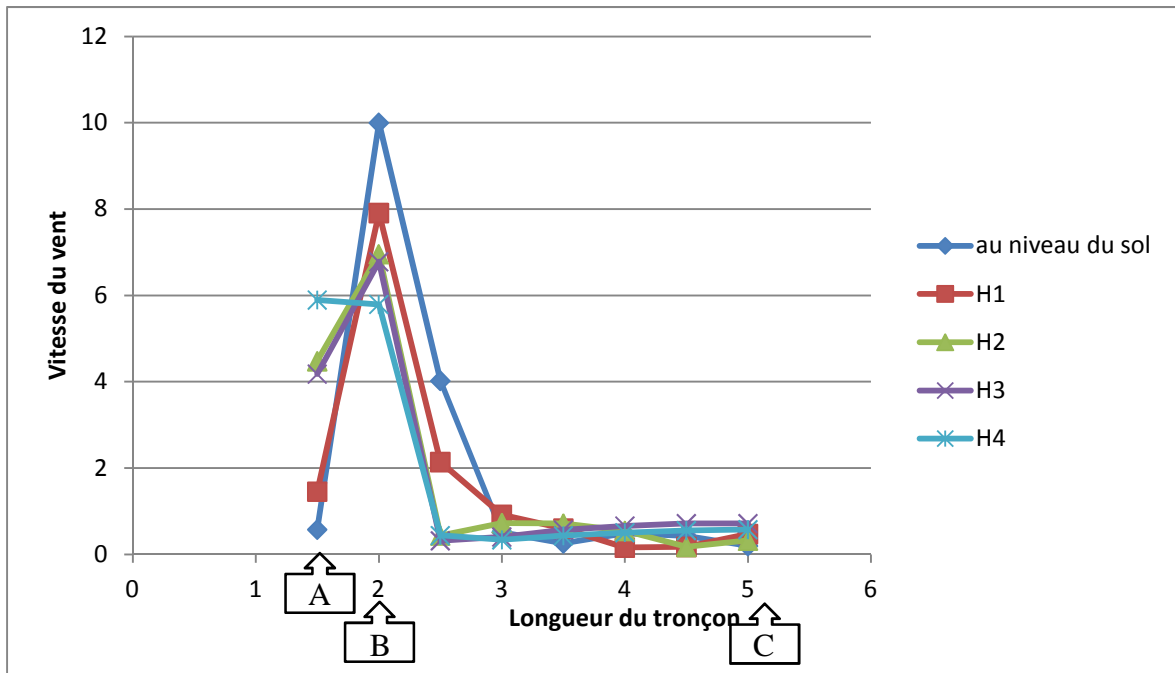


Fig. n° VI.11 : vitesse d'écoulement de l'air à des hauteurs différentes dans la zone 01 (avec jet d'eau) (3<sup>e</sup> cas) . Source : Auteur.

Les hauteurs choisies correspondent à des hauteurs d'étages de nos bâtiments.

Les valeurs simulées au point A sont celles enregistrées à la façade du bâtiment 'A'. Le point B correspond à l'emplacement du jet d'eau tandis que les valeurs au Pt C, sont les vitesses d'écoulement qui atteignent la façade du bâtiment 'B'.

Nous remarquons que :

- Les valeurs maximales de vitesse sont enregistrées à l'emplacement du jet d'eau.
- Au pt A, les valeurs de la vitesse de l'air s'amplifient en montant en hauteur.
- Les valeurs enregistrées au-delà du jet, décroissent pour atteindre des valeurs minimales sur la façade du bâtiment B.

La figure (VI.13) représente l'évolution des vitesses d'écoulement à l'interface bâtiments/ espace extérieur.



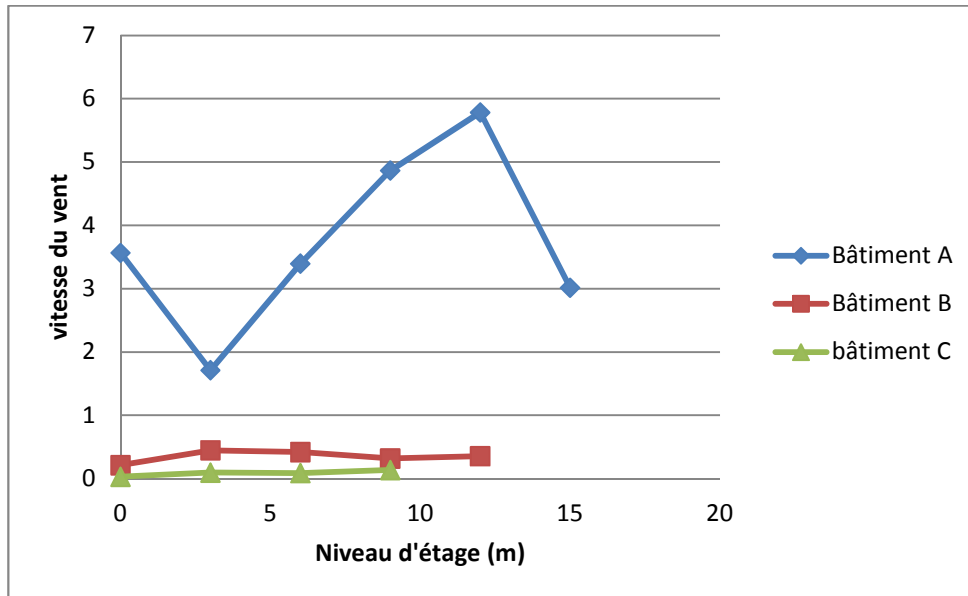


Fig. n° VI.12 : vitesse d'écoulement de l'air au niveau des enveloppes des bâtiments (3<sup>e</sup> cas)  
Source : Auteur.

Le bâtiment 'A', enregistre les valeurs les plus élevées, tandis que la vitesse de l'air est minimale pour les façades des bâtiments B et C.

Ses variations, trouvent explications dans les interrelations qui existent entre les paramètres climatiques.

La modification de la température et l'humidité relative, que provoque le jet d'eau par le processus d'évaporation et par les embruns qu'il est peut générer, entraîne des différences de pressions (voir fig.VI.14), de masses volumiques et de la viscosité de l'air.

Les champs de pression influent sur le potentiel de ventilation naturelle à l'intérieur du bâti tandis que les flux convectifs ont une part importante dans la charge et la décharge d'énergie dans les parois des bâtiments. De plus, les courants d'air à l'échelle du quartier sont les vecteurs du transport d'énergie (masse d'air chauffées ou refroidies un peu plus loin), d'évacuation ou d'apport de polluants.

Sur la figure (VI.14), les valeurs de pression sont plutôt homogènes sur l'ensemble de la scène à l'exception de différences perçues au niveau du jet d'eau et à proximité du bâtiment A.

La zone 01 qui comporte le jet d'eau, enregistre comme nous l'avons vu ci-dessus, un mouvement d'air plus accentué. Les transferts d'énergie par convection naturelle, ont plus de chance de se produire à ce niveau ainsi que le renouvellement de l'air à l'intérieur des bâtiments.

La masse volumique de n'importe quelle substance, dépend de la température et la pression.

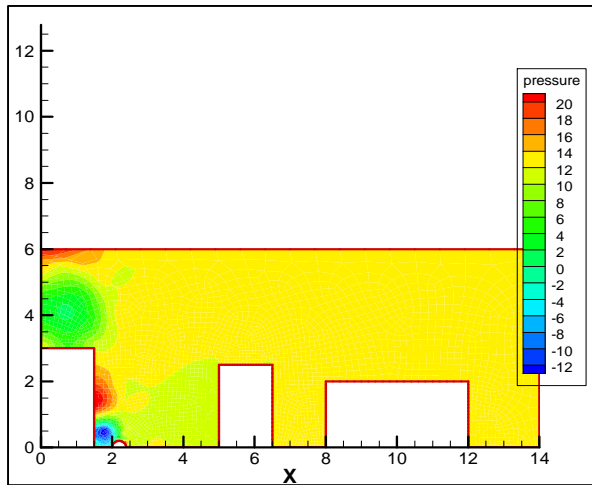


Fig. n° VI.13 : Champ de pressions  
(3<sup>e</sup> cas). Source : Auteur.

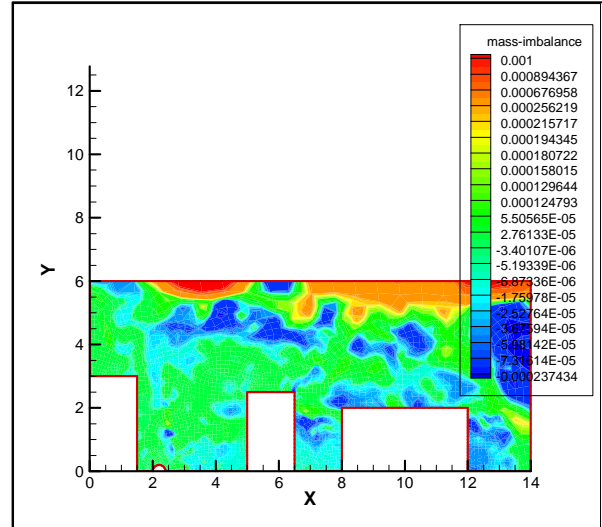


Fig. n° VI.14 : concentration des masses  
(3<sup>e</sup> cas). Source : Auteur.

## Conclusion :

L'effet espéré d'une présence de dispositif d'eau dans le milieu urbain est principalement lié aux caractéristiques particulières de l'eau (son inertie thermique et son coefficient de réflexion) mais aussi au processus d'évaporation qui est particulier à l'eau.

Le dispositif choisi pour cette étude est le jet d'eau. Composé d'une surface d'eau en plus du jet (avec son écoulement et les embruns qu'il libère), ce type de dispositif est censé apporter un double effet.

La simple analyse des processus qu'expérimente une seule goutte en se déplaçant dans l'air, nous renseigne sur le potentiel rafraichissant de l'eau :

- Au début, on assiste à un transfert de la chaleur de l'air vers la goutte (si l'air est plus chaud que la température de la goutte).
- Par la suite, l'eau s'évapore de la goutte vers l'air environnant. La goutte est à présent plus chaude et s'évapore.

Deux processus affectent la température de la goutte de manière différente. Le transfert de chaleur va augmenter sa température, alors que l'évaporation va la refroidir. Comme résultat de ces processus, l'équilibre thermique de la goutte sera atteint. Une fois la goutte atteint la température humide l'énergie nécessaire pour évaporer plus d'eau vient de l'air environnant, ce qui fait que ce dernier se refroidit.

Le pouvoir rafraichissant de l'eau est comme nous venons de le voir prouvé, mais il reste à le tester et le quantifier à une échelle urbaine réduite, et c'était là, l'intérêt principal de notre étude.

Les cas étudiés présentent des différences d'échelles, de complexité, de conditions d'entrée et d'objectifs. Les simulations entreprises, nous ont donné des preuves quant au rôle régulateur de l'eau.

Par le processus d'évaporation, l'eau, entraîne des réductions de températures et aussi des modifications des différents paramètres climatiques.

**Pour le 1<sup>er</sup> cas**, avec des conditions d'entrée de 24°C de température et 40% d'humidité, l'abaissement des températures obtenu est de l'ordre de 3°C. Tandis que L'humidité relative a connu une augmentation d'une moyenne de 8.5%.

**Dans le 2<sup>e</sup> cas**, la baisse de température obtenue est d'une moyenne de 5°C. L'humidité relative a augmenté de 9.5%. Les valeurs d'entrée dans ce cas correspondent à une température de 38°C, et une humidité relative de 20%.

**Le 3<sup>e</sup> cas**, nous a démontré que la proximité du dispositif d'eau est un des paramètres qui déterminent le degré d'amélioration des conditions climatiques. L'effet du jet d'eau s'étale sur un périmètre et une hauteur donnés, et qui peut être amplifié ou réduit, d'une part, par les conditions climatiques du lieu et d'autre part, par la configuration des constructions.

Les valeurs simulées, varient d'un point à un autre de nos scènes urbaines. Ces différences répondent à des interactions entre les nouveaux paramètres microclimatiques (obtenus après simulation). La température et la pression déterminent les mouvements de l'air et la concentration des masses humides. Le vent joue aussi un rôle essentiel sur les processus d'évaporation, car c'est lui qui permet par le mélange de l'air ambiant de remplacer au voisinage de la surface évaporante, l'air saturé par de l'air plus sec. Il est possible d'exprimer ces interactions par des équations mathématiques (nous en avons cité quelques unes dans nos chapitres précédents).

Ainsi, la présence du jet d'eau, nous a permis de quantifier des valeurs d'améliorations des conditions climatiques. Mais cette amélioration, reste tributaire, de plusieurs paramètres. Les interactions climatiques, tout comme la configuration urbaine en plus des caractéristiques du dispositif d'eau sont les plus influents.

## **Discussion :**

*L'influence des résultats obtenus sur le bien-être des occupants et la consommation énergétique dans les bâtiments :*

D'après [Musy. M, et al, 2012] l'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments, dépend de trois échelles:

- L'échelle du bâtiment, pour laquelle les approches sont basées sur l' « isolement » d'un bâtiment où sont réalisés des bilans de masse et de chaleur, afin d'évaluer soit la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir une température de confort imposée, soit la température dans les différents espaces du bâtiment.
- L'échelle du bâtiment et de son environnement proche, c'est-à-dire la zone autour du bâtiment qui a une influence sur la consommation d'énergie de ce bâtiment.
- L'échelle du quartier pour répondre à des applications dans lesquelles il s'agit par exemple d'évaluer l'impact de politiques urbaines sur la consommation énergétique d'un quartier.

A l'échelle du bâtiment, les caractéristiques de l'enveloppe interviennent de manière significative dans la détermination des comportements thermiques de ce premier. Les matériaux, leur inertie thermique, couleur, rugosité et autres sont des éléments à prendre en considération lors des quantifications des bilans thermiques. Il s'agit d'évaluer l'impact de l'environnement sur les différents flux à l'interface bâti-environnement :

- flux de chaleur par convection (modifié par la vitesse de l'air à proximité des parois et les variations locales de la température extérieure).
- flux solaire (direct, diffus, réfléchi).
- flux de chaleur par rayonnement infrarouge échangé avec la voûte céleste et les surfaces environnantes.
- flux dus à la ventilation et aux infiltrations.

Nous, à ce stade d'étude, nous avons adopté une approche simplifiée, qui consiste à définir les limites ou les intervalles acceptables de température et humidité, les comparer avec les résultats obtenus dans cette partie, et les traiter théoriquement par rapport aux résultats d'études établies à travers le monde.

Comme nous l'avons vu dans le 3e chapitre, Les échanges thermiques et hydriques entre les occupants et les ambiances intérieures peuvent être approchés par des équations d'équilibre entre le métabolisme et les transferts convectifs, radiatifs, conductifs à la

surface du corps ainsi que la sudation. Des degrés d'insatisfaction sont ainsi enregistrés dans certaines conditions climatiques. L'intervention sur ces dernières, par la proposition de techniques alternatives peut être bénéfique.

L'abaissement de la température d'air par exemple, permet non seulement de limiter les besoins de conditionnement d'air mais améliore également les rendements des climatiseurs, d'où économies d'énergie envisageables. De plus, si nous nous plaçons à l'échelle de la ville, les effets cumulés peuvent engendrer des atténuations importantes des températures et une réduction de l'îlot de chaleur urbain peut être espérée grâce à l'eau. Enfin, les niveaux de confort peuvent être plus facilement atteints.

Exposé à son environnement, le corps humain réagit par une interaction dynamique mobilisant un ensemble de réactions rétroactives volontaires et involontaires, qui permettent de contrôler les échanges thermiques avec cet environnement afin de satisfaire les exigences de l'homéothermie. Il peut avoir chaud ou froid dans des conditions extrêmes qui peuvent le plonger en hyperthermie ou hypothermie. Ces sensations entrent dans le cadre de l'inconfort que peut ressentir l'individu.

Parmi les sources nombreuses d'inconfort locaux (voir chapitre III), l'air respiré trop chaud ou à une humidité insuffisante. Ces mêmes caractéristiques correspondent à notre situation d'étude et que nous avons voulu améliorer.

Le corps, face à ces situations, réagit par un ensemble de mécanisme :

- La vasodilatation, qui est l'augmentation du débit sanguin jusqu'à 10fois dans l'ensemble du corps et 30fois dans les mains. Ce phénomène entraîne une modification de la conductivité apparente qui pourrait aller jusqu'à  $55 \text{w/m}^2 \cdot \text{C}^\circ$ . Cependant ce mécanisme a une faible efficacité, il ne peut compenser qu'un ( $1^\circ\text{C}$ ) degré d'élévation de température.

- La perspiration des individus existe toujours et est au minimum de 6 %. En dessous de 12 % la moiteur n'est pas perceptible et le corps semble sec. De 12 à 30%, le corps ressent une faible moiteur puis des zones humides apparaissent. Au-delà de 30 % l'efficacité de la sueur tombe en dessous de 1 car les gouttes de sueur de grandes tailles ne peuvent pas s'évaporer [Berger 1998]. L'inconfort augmente avec la valeur de cet indice qui avertit le corps d'un recours à un processus de sueur.

- La transpiration grâce à l'évaporation de la sueur. Chez l'homme exposé à la chaleur, la production et l'évaporation de la sueur représentent le mécanisme thermorégulateur le plus puissant et le seul efficace pour lutter contre l'hyperthermie.

- Pertes par respiration : l'air à la sortie des poumons est pratiquement saturé en humidité. Les poumons fonctionnent comme un échangeur de surface quasi infinie, d'environ 100 m<sup>2</sup>. L'air expiré est quasiment saturé d'humidité. En ambiance sèche, la quantité de vapeur d'eau expirée est de l'ordre de 30 g/h. Les pertes apparaissent sous deux formes : pertes par chaleur sensible dues au réchauffement de l'air inspiré et pertes par chaleur latente dues à l'humidification de celui-ci.

Si la réponse de l'individu dans son environnement thermique paraît si complexe, les réactions peuvent être aussi efficaces pour les limiter. Et c'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude.

Les améliorations que nous avons pu observer et quantifier à travers ce travail, ne peuvent qu'être bénéfiques pour le confort des individus que se soit en espace extérieur ou intérieur. La sensation d'inconfort dans ces nouvelles conditions sera réduite.

Un meilleur taux d'humidité, rend l'air plus agréable à respirer et une augmentation de la vitesse de l'air, accélère les échanges par convection (qui peuvent se multiplier avec une simple augmentation de 0 à 2 m/s). Elle participe aussi à l'évaporation de la fraction de surface cutanée mouillée en éliminant la sueur pour garder la peau plus fraîche et plus sèche.

De meilleures conditions de confort impliquent automatiquement une réduction du recours aux systèmes de climatisation actifs.

En saison estivale, les bâtiments climatisés ont une consommation énergétique accrue : les exigences du confort et la climatisation se développent fortement. Les charges thermiques peuvent doubler par l'effet de l'îlot de chaleur urbain, alors que le coefficient de performance des systèmes d'air conditionné peut se réduire de 25%.

Une étude sur six villes américaines a montré, qu'un pic de puissance appelée augmente de 2 à 4% pour une augmentation de 1°C au-delà de 15-20°C. Un petit calcul nous démontre qu'à 38°C de température par exemple, comme c'est le cas pour notre 2<sup>e</sup> scène, la puissance peut s'amplifier de 20% minimum, bien sûr il faut prendre en considération les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment.

L'amélioration de 5°C, engendrée par la présence du jet d'eau, pourrait réduire ce taux de presque 8%. Ajoutée à d'autres améliorations dans les autres jours, l'effet serait considérable. Le principe de la théorie du chaos nous inspire ici pour dire, que de petites causes peuvent avoir de grands effets.

Cependant, une telle méthode de calcul, ne pourrait donner de réels résultats sur les réductions espérées par l'intervention sur le contexte urbain et la modification de ses paramètres climatiques. Il est certain que ces améliorations ont des conséquences directes et indirectes sur les économies d'énergies, mais leur quantification, nécessite la prise en compte d'autres paramètres, tel que les caractéristiques de l'enveloppe par exemple. Cette étude, constitue un 1<sup>e</sup> pas qui espérons nous, nous conduira à la formulation de méthodes ou programmes qui nous permettront de donner des solutions conceptuelles.



## **CONCLUSION GÉNÉRALE :**

## Conclusion générale :

La consommation énergétique des bâtiments représente aujourd'hui, la plus importante part de la facture globale et pourrait encore croître du fait de l'augmentation permanente de la population mondiale et l'évolution simultanée des exigences des usagers pour maintenir leur confort. Des innovations techniques de construction permettent aujourd'hui de hausser la performance énergétique des bâtiments, cependant, elles ne suffisent pas encore à atteindre les objectifs énergétiques fixés par les directives d'une démarche de développement durable. [Bouyer. J, 2009]

Le comportement énergétique des bâtiments, n'est pas seulement régi par leur construction, mais dépend avant tout de la sévérité des conditions climatiques environnantes. L'aménagement local peut complètement modifier le climat au sein d'un fragment urbain. Notre travail proposait alors, d'évaluer l'impact des dispositifs d'eau sur les conditions climatiques environnantes et le bâtiment qui en fait partie.

Le développement de notre manuscrit dépendait de trois Composantes fondamentales ; l'eau comme élément de la nature, énergie et outil d'aménagement urbain ; le bâtiment comme système complexe, qui a pour but de garantir des conditions de bien-être à ses occupants et les conditions climatiques, que le premier élément traité à savoir ; l'eau, pourrait modifier afin d'apporter une amélioration sur les températures et l'humidité qui atteignent l'enveloppe de notre système.

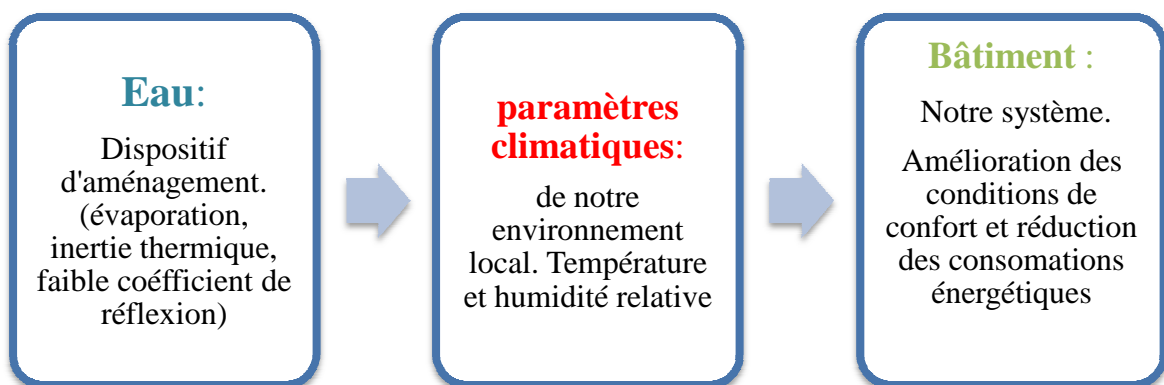


Fig. n° 0.1 : schématisation du principe d'évolution de l'étude.  
Source : Auteur.

Afin de réaliser ce processus d'évolution, notre étude s'est décomposée en deux principales parties. La première constitue un apport bibliographique, qui traitait de chacune des trois composantes citées ci-dessus.

L'eau, en tant qu'élément riche en synonymes, à suscité un intérêt particulier dans notre étude. On a essayé de cerner ses différentes dimensions pour arriver à comprendre, comment pourrait-on tirer le meilleur de ses qualités. Dans un premier temps, nous avons abordé la richesse symbolique de cet élément de la nature et qui a de plus en plus pris part dans le quotidien et l'espace de vie des individus. Une richesse qui s'est traduite par une intégration de l'eau dans la ville et le bâtiment.

Nous avons vu que la naissance et le développement des premières agglomérations, étaient fortement liés à la présence d'eau. Les ouvrages d'adduction d'eau développés constituent, jusqu'à nos jours des chefs d'œuvre à part entière.

La définition de l'eau ne s'arrête pas à la simple association : eau – vie, ses qualités lui confèrent une variété de tâches. L'eau était devenue, une marque de richesse, pouvoir, elle était sculptée, mise en scène et devenait peu à peu un outil de composition du paysage.

La relation qu'entretiennent les hommes avec cet élément a souvent nourris l'imaginaire des architectes et urbanistes pour des projets où le liquide et le solide se complétaient ou s'opposaient. Plusieurs villes s'étaient développées en respect des implications fonctionnelles et formelles des plans d'eau. Nous avons aussi présenté dans notre premier chapitre, quelques exemples de projets architecturaux, parmi tant d'autres, construits à différentes époques et où les concepteurs avaient exploité l'eau, sous différentes formes. La tendance écologique ne s'est pas aussi détachée de l'eau ; elle encourage son intégration et surtout sa préservation.

La tâche écologique de l'eau a ainsi fait l'objet du 2<sup>e</sup> chapitre. Comme nous l'avons vu, la dégradation écologique a conduit à une urgence de réagir. Différentes solutions ancestrales ont été réadaptées aux nouveaux besoins, le rafraîchissement par évaporation d'eau est une des techniques employées dans les climats chaud et sec. Le processus d'évaporation, les caractéristiques physiques (capacité thermique, masse volumique, etc.) ainsi que chimiques (solvant naturel, etc.) que nous avons présentés dans le 2<sup>e</sup> chapitre étaient nécessaires pour comprendre le rôle régulateur de microclimat qu'accomplit l'eau.

Aussi, le rappel des principes physiques de transfert de chaleur, notamment, la convection et la conduction nous expliquent les phénomènes qui se produisent entre l'eau, l'air, le sol et le bâtiment.

Des études ont démontrées que l'influence des fontaines reste ponctuelle, la faible surface de contact en est la principale cause, tandis que les jets d'eau offrent plus d'avantage en

matière de réduction de température et d'augmentation de l'humidité relative, chose qui justifie le choix de ce dispositif pour notre simulation.

Les bassins, quant à eux, fonctionnent comme des espaces tampons qui stockent d'importantes quantités de chaleur et n'en restitue qu'un faible pourcentage. La grande capacité thermique de l'eau, là rend peu sensible aux variations de température. Nous avons vu que :

- Les apports énergétiques solaires, qui arrivent à la surface sont faiblement réfléchis (3% pour les heures de rayonnement maximal). La partie absorbée entraîne une légère voire négligeable augmentation de la température de l'eau.
- Pour que l'eau s'évapore, il faut une grande quantité d'énergie (2450 kJ pour 1kg d'eau, soit une épaisseur de 1mm sur une surface de 1m<sup>2</sup>). Une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur latente. C'est pourquoi la température de l'eau est inférieure à celle de l'air durant la journée.
- Afin d'atténuer ce décalage, un transfert qualifié de chaleur sensible entre l'air chaud et l'eau froide s'effectue en fonction de la température et la vitesse d'écoulement. Donc en premier temps l'eau s'évapore et refroidit l'air et dans un second temps refroidit l'air.
- Aussi, l'eau renvoie moins de rayonnement solaire (coefficient de réflexion bas) et émet un rayonnement thermique plus faible.
- Les dispositifs d'eau ne réagissent pas tous de la même façon, donc il est important d'en choisir un, en fonction des besoins de rafraîchissement et humidification de l'espace. Une panoplie de systèmes de rafraîchissement par l'eau a été exposée dans la dernière partie du chapitre. L'évolution des techniques permettra l'intégration de cet élément dans l'espace architectural. Certaines d'entre elles ont donné leur preuve quant à la réduction des températures, rendant ainsi l'espace plus confortable, et améliorent les conditions de bien-être.

Dans le troisième chapitre, le bâtiment était présenté comme un système qui a pour but d'assurer le confort de ses occupants. Son enveloppe constitue la frontière de ce système " Bâtiment", c'est par elle que s'opère l'échange de matière, énergie, ou information avec son environnement par rapport à la finalité de procurer un environnement intérieur favorable aux activités des occupants [Moujalled. B, 2007].

Elle réalise ainsi la clôture du système bâtiment qui est en interaction avec un environnement extérieur (l'urbain) et l'environnement intérieur (l'occupant).

Cette considération nous a conduits à aborder le confort thermique selon les échanges qui s'opèrent entre le bâtiment et son occupant. Nous avons aussi présenté quelques indices de stress thermique ou l'absence de confort, l'impact direct du microclimat constitue la principale cause de ces situations de désagrément.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté l'échelle de notre étude qui est l'échelle microclimatique. A ce niveau, l'homme peut intervenir pour l'amélioration des conditions climatiques, en installant des dispositifs d'eau, des plantations, un choix judicieux de matériaux, etc.

Nous avons pris conscience de la complexité des phénomènes microclimatiques qui se passent au niveau de la canopée urbaine. Le plus connu est celui de l'îlot de chaleur urbain, qui correspond à une augmentation des températures par rapport à celles enregistrées en milieu rural. La forte urbanisation, la réduction des vitesses du vent par les bâtiments et la minéralisation des sols, le remplacement des zones végétales et surfaces d'eau par revêtements absorbants comme l'asphalte et le béton en sont les principales causes.

Des recherches établies dans le domaine de la micro climatologie, nous ont permis de comprendre et évaluer l'effet positif qu'apportent les installations et aménagements urbain, végétaux, les surfaces d'eau, etc. d'importantes différences de températures ont été atteintes, ces différences se conjuguent en réduction considérables des consommations énergétiques.

Notre contribution dans cette recherche, s'explique à travers les deux derniers chapitres du manuscrit.

Le climat de la wilaya de Biskra, constitue un terrain favorable pour l'expérimentation de notre hypothèse principale qui concerne l'évaluation du rôle régulateur du microclimat que pourrait accomplir la présence d'un dispositif d'eau. L'examen des données climatiques, nous a confirmé le caractère sec et chaud de Biskra, ainsi l'examen de notre expérience s'est déroulé dans des conditions extrêmes de température et humidité. Nous avons composé trois scènes urbaines qui regroupent un ensemble de critères nécessaires à notre étude, à savoir : différentes hauteurs de bâtiments, configuration, et disposition par rapport à notre dispositif de référence et différentes conditions d'entrée. Un jet d'eau de débit régulier est l'élément d'aménagement utilisé dans notre étude. Ce type de dispositifs est composé d'une surface d'eau en plus d'un jet caractérisé par son écoulement et les embruns qu'il libère dans l'air, peut apporter un double effet quant à l'amélioration des conditions climatiques.

Les trois cas étudiés se caractérisent par ce qui suit :

- Le premier cas est une scène complexe en 3D, qui regroupe un ensemble de bâtiments de configurations et hauteurs différentes. L'objectif principal de cette configuration, en plus de l'étude des variations climatiques est d'observer les mouvements d'air. Les conditions d'entrée pour cette modélisation correspondent aux valeurs moyennes annuelles.

- Dans le deuxième et le troisième cas, la température et l'humidité relative qui constituent les conditions aux limites, sont les valeurs observées le mois de juillet. A travers ces deux cas, nous approchons le bâtiment, à travers la valeur des paramètres climatiques atteignant son enveloppe.

Afin de pouvoir répondre aux objectifs de l'étude, nous considérons toutes les autres variables comme constantes et homogènes dans toute la canopée.

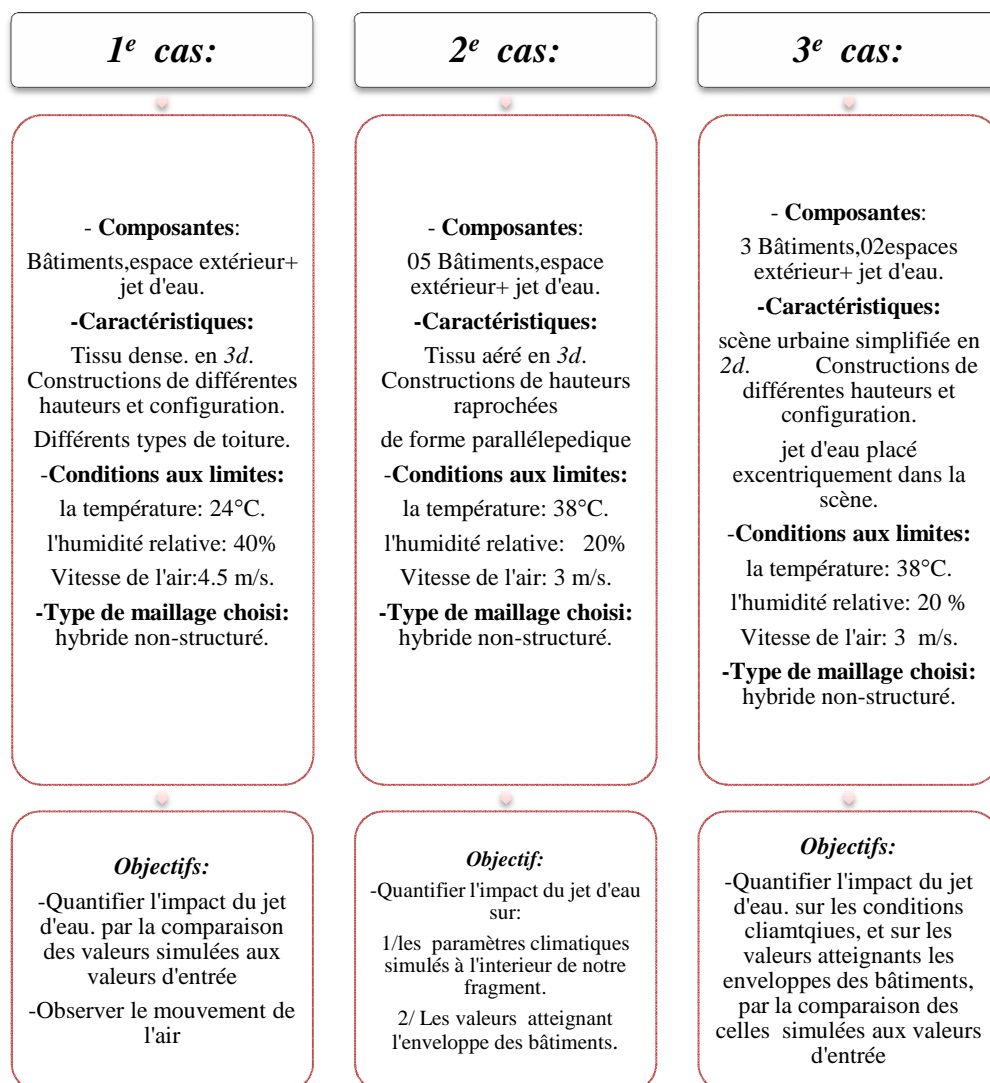


Fig. n° 0.2: récapitulatif des cas d'études  
Source : Auteur.

Le recours à la simulation s'était présenté, comme la meilleure solution dans notre cas, d'une part, par la flexibilité qu'offrent les outils numériques et la possibilité de contrôler les données. Et d'autre part par sa faisabilité, vu le manque voir même l'absence de ce type de dispositifs dans nos milieux urbains.

Le code CFD, fluent est basé sur le principe d'équations différentielle Navier et Stokes, que nous avons détaillées dans le cinquième chapitre. La simulation s'est faite sur trois étapes principales : création et maillage de la géométrie sur Gambit, interface modelleur de Fluent. Par la suite une modélisation sur fluent avec la fixation des conditions aux limites d'entrée, nous a permis d'avoir un ensemble de résultats qui seront interprétés sur Tecplot360, outil d'aide pour les analystes et concepteurs.

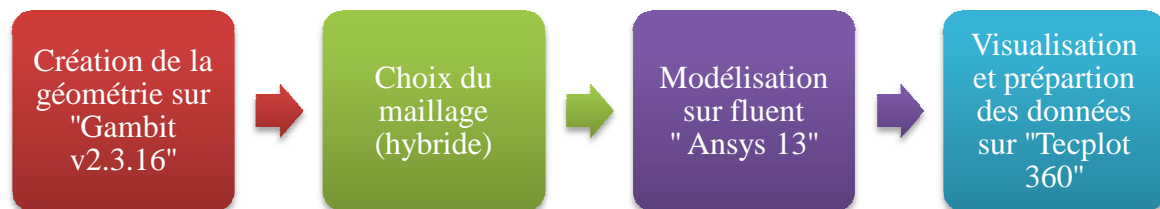


Fig. n° 0.3 : schématisation des étapes de modélisation.  
Source : Auteur.

L'interprétation des résultats, dans le dernier chapitre, nous a permis d'observer et de quantifier des améliorations considérables des paramètres climatiques :

- Pour le 1<sup>er</sup> cas, avec des conditions d'entrée de 24°C de température et 40% d'humidité, l'abaissement des températures obtenu est de l'ordre de **3°C**. Tandis que L'humidité relative a connu une augmentation d'une moyenne de **8.5%**.

- Dans le 2<sup>e</sup> cas, la baisse de température obtenue est d'une moyenne de **5°C**. L'humidité relative a augmenté de **9.5%**. Les valeurs d'entrée dans ce cas correspondent à une température de 38°C, et une humidité relative de 20%.

- Le 3<sup>e</sup> cas, nous a démontré que la proximité du dispositif d'eau est un des paramètres qui déterminent le degré d'amélioration des conditions climatiques. L'effet du jet d'eau s'étale sur un périmètre et une hauteur donnés, et qui peut être amplifié ou réduit, d'une part, par les conditions climatiques du lieu et d'autre part, par la configuration des constructions. Ces améliorations ont pour cause unique l'effet du jet d'eau (vu que tous les autres paramètres sont constants).

L'impact positif de cette technique alternative est ainsi prouvé en des conditions climatiques chaudes. Et ces améliorations, auront certainement des conséquences directes et indirectes sur les économies d'énergie. La présente étude, nous a permis d'approcher ou de confirmer l'influence du contexte urbain sur les demandes énergétiques et les conditions de confort des individus.

Par ailleurs, l'expérimentation de ces différents cas, nous a démontré, qu'un tel effet ne peut être généralisé. Il est difficile de prescrire des recommandations et des solutions conceptuelles. La complexité du contexte urbain, les particularités de chaque cas, les besoins énergétiques, les paramètres climatiques et les caractéristiques des enveloppes de bâtiments sont tous, des paramètres à prendre en considération et qui font que chaque cas doit être pris séparément.

La présente étude était utile dans le sens où elle nous a permis d'obtenir des résultats quantifiables de l'influence d'une présence d'eau sur les conditions climatiques, et nous a permis d'approcher l'amélioration des conditions de bien-être et ses conséquences sur les consommations énergétiques. Cependant, même si l'objectif de départ est atteint, de nombreuses améliorations peuvent être implémentées à rendre encore plus précise l'analyse du microclimat et le confort des individus.



## **Perspectives de recherche :**

Le traitement de ce sujet et les difficultés que nous avons affrontées, nous ont permis de découvrir d'autres dimensions qui pourraient constituer d'intéressants thèmes de recherches.

Nous rappelons que l'objectif principal du présent travail, était de caractériser par le biais de la modélisation numérique l'impact d'une présence de dispositif d'aménagement d'eau sur les conditions climatiques locales, afin de réduire les sollicitations thermiques de l'été et la surconsommation énergétique. A ce niveau d'étude nous nous sommes limité à une résolution plutôt simplifiée. Cependant, il reste beaucoup à faire dans cette thématique :

- Il serait intéressant de prendre en considération, une autre composante climatique qui est le flux solaire dans la quantification des améliorations des paramètres climatiques. on pourrait éventuellement choisir, un ou plusieurs fragments urbains existants qui pourraient nous renseigner plus sur les interactions climat/ dispositif d'eau.

- Les exigences de confort actuel, entraînent comme nous l'avons vu, une utilisation plus massive des systèmes de climatisation en périodes estivales. Les gaz rejetés par ces derniers, ont pour effet d'augmenter la température. Pour pouvoir prendre en considération, cet effet rétroactif dans la modélisation des performances énergétiques des bâtiments, il est nécessaire de coupler la modélisation du microclimat urbain à la modélisation des ambiances intérieures des bâtiments. Des couplages CFD avec d'autres logiciels pourraient nous permettre plus de précision.

A cette étape, les caractéristiques de l'enveloppe, sol et toiture, morphologie urbaine, etc. peuvent être intégrées pour avoir des résultats plus précis.

- Le rôle micro régulateur de l'eau, dépend aussi de la forme qu'elle prend (jet d'eau, bassin, étang, etc.), de sa surface, densité et aussi profondeur. Une étude comparative pourrait conduire à l'établissement de recommandations quant aux formes les plus appropriées à un type de climat et dans un contexte urbain précis

- L'effet des dispositifs d'eau en urbain, peut être considérablement amplifié par la présence de la végétation. les arbres, surfaces végétales permettent de réduire les réflexions solaires, favorisent l'ombre et aussi rafraichissent par le processus d'évapotranspiration.

- La cadre sonore généré par l'écoulement d'eau dans une fontaine, jet d'eau ou encore cascade est aussi, un élément intéressant à aborder. La présence de tels

dispositifs en espace urbain atténue le désagrément provoqué par la circulation ou autres bruits.

- Les techniques de rafraîchissement évaporatif, sont nombreuses. Une étude comparative sur l'efficacité de ces systèmes employés à l'échelle du bâtiment, permettrait de ressortir un ensemble de recommandations.

# **RÉFÉRENCES**

## **BIBLIOGRAPHIQUES :**

**Akbari. H, Davis. S, Dorsano. S et al.(1992).** “*Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing. U.S. Environmental Protection Agency*”. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory.

**Aubry, H et al, (2008),** “*Les jeux de l'eau, de l'homme et de la nature*”, édition La Dispute Paris.

**Athamena. K, (2012),** “*Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers.*”, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.

**Bachelard.G, (1942),** “*L'eau et les rêves, essai sur l'imagination de la matière*”, Editions José Corti, Paris.

**Ballout. A, (2010)** “*Le rôle de la végétation et l'eau dans la création d'un microclimat urbain « cas de la place de Ain el Fouara a Sétif »*”, mémoire de magistère, université de Constantine.

**Baridon. M, Chomarar-Ruiz. C, Sichet. F, (2007)** “*L'eau, esprit vivant du jardin*” Journée D'étude organisée dans le cadre des Rendez-vous aux jardins 2007 par la Direction de l'architecture et du patrimoine et le Conseil national des parcs et jardins.

**Beazley. E, Harverson. M, (1985)** “*Planning with the climate, the traditional attitude to water in the villages of the Iranian plateau*”, Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 2, disponible en ligne sur: [http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=6312](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=6312), consulté février 2011.

**Belakehal. A, Bennadji.A , Tabet Aoul. K, (2009),** “*Towards an occupant based conceptual model, case of the natural luminous ambience.*” PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009,

**Benhalilou. K, (2008),** “*Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment, Cas du climat semi aride*”, mémoire de magistère, université de Constantine.

**Benlatreche. T, (2006),** “*Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics*”, mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie.

**Benzerzour. M, (2004),** “*Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique*»”, thèse de doctorat, université de Nantes.

- Boudjellal. L, (2009)** *“Rôle de l’oasis dans la création de l’îlot de fraîcheur dans les zones chaudes et arides « Cas de l’oasis de Chetma -Biskra –Algérie »”*, mémoire de magistère, université Mentouri Constantine.
- Bouguerra. M-L, (2006)** *“Symbolique et culture de l’eau”*, les rapports de l’institut Veolia Environnement,
- Boumessenagh. A, (2007)** *“Les inondations dans la ville de Biskra : Causes et impacts”* mémoire de magistère, université de Batna.
- Boussoualim. A, (2002)**, *“Contribution à la caractérisation de l’impact et de l’incidence du microclimat sur l’usage et les activités en espace public extérieur : étude de cas à Blagnac”*, Thèse de doctorat en Sciences pour l’ingénieur université de Nantes.
- Boutteba. S-D, (2007)**, *“Confort thermique urbain entre mesures et perception”*, mémoire de magistère, université de Biskra.
- Bouyer. J, (2009)**, *“Modélisation et simulation des microclimats urbains Étude de l’impact de l’aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments”*, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l’université de Nantes.
- Bozonnet. E, (2005)**, *“Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon”*, Thèse de doctorat, université de la Rochelle.
- Bozonnet. E, (2008)**, *“concevoir et construire en milieu urbain. Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique”*, publié dans « futur de l’habitat », Edition Jac Fol, 139-154.
- Brunon. H, (ND)** *“La maîtrise de l’eau dans les jardins, de l’Antiquité à nos jours”*, Association des Professeurs d’Archéologie et d’Histoire de l’Art des Universités. APAHAU, séquence pédagogique.
- Cadoni. G, (2012)**, *“Les systèmes de rafraîchissement passifs dans l’architecture contemporaine et la conception bioclimatique du bâtiment”* 2nd International Congress on Ambiances, Montréal 2012.
- Caudrelier. M, (2010)**, *“Architectur’eaux”* disponible en ligne sur <http://www.duralpes.com/architectur%E2%80%99eaux/>, consulté septembre 2012
- Cerasi Maurice. M, (1985)**, *“Open Space, Water and Trees in Ottoman Urban Culture in the XVIIIth - XIXth Centuries”* Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 2, disponible en ligne sur [http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=6312](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=6312), consulté février 2011.

- Cordier. N, (2007),** “ *Développement et évaluation de stratégies de contrôle de ventilation appliquées aux locaux de grandes dimensions*”, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Degrotte. V, (2006),** “*Eau et urbanisme*”, synthèse des débats de la journée eau et urbanisme à Machecoul, Logne, février 2006.
- Djouimaa. A, (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, université de Constantine.
- Dreiseitl. H, Grau. D, (2001)** “*New Waterscapes, Planning, Building and Designing with Water*” Birkhäuser – Publishers for Architecture.
- Dunnett. N, Clayden. A, (2007),** “ *Les jardins et la pluie, Gestion durable de l’eau de pluie dans les jardins et les espaces verts*”, Rodez, Editions du Rouergue.
- Dupperon. Océane, (2011),** “ *Modélisation thermique dynamique du rafraîchissement passif*” Rapport de TFE, entpe lyon.
- El Faïz. M, (2005)** “*Les maîtres de l’eau, histoire de l’hydraulique arabe*”
- Fathy. H, (1963)** “*Housing with climate and Comfort*”, the architectural press.
- Fluent Inc, (2006),** “*FLUENT 6.3 Tutorial Guide*”, septembre 2006.
- Français. E, Duncan L, et associés, (1999)** “*Construire Avec La Nature, Vingt Architectures Dans Le Paysage*”, Edition collection jardins des paradis (EDISUD).
- Glikou. M, (2005),** “ *les architectures de l’eau*”, article paru dans la revue trimestrielle, Construction moderne, n°120, 3<sup>e</sup> trimestre 2005.
- Gros. A, Bozonnet. E, Inard. C, (2012),** “*Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l’échelle d’un quartier*”, article paru dans la revue, Références, Modélisation urbaine : de la représentation au projet. Septembre2012.
- Gulea. M, (2005)** “*Métamorphoses du symbole de l’eau dans la poésie de Ana Blandiana*”. Dialogos, 11/2005.
- Hidiroglou. P, (1994)** “ l’eau divine et sa symbolique, essai d’anthropologie religieuse” sur Google ebooks
- Hollmuller. P, et al, (2009)** “*Etude comparative de diverses techniques de rafraîchissement passif, pour un bâtiment administratif en climat d’Europe Centrale*” 1er Congrès de l’Association Marocaine de Thermique, Mai 2009.
- Izard. J-L, (1993),** “*Architecture d’Eté, Construire Pour le Confort d’Eté*”, édition Edisud. Paris.

- Kedissa. Ch, (2010)** “ *impact de la géométrie des espaces extérieurs sur le microclimat urbain « cas des places »*”, mémoire de magistère, université Mentouri de Constantine.
- Kergomard. C,(2007)**, “*A chaque ville son microclimat*”, revue sciences et avenir, n°730, paris, décembre 2007.
- Khecharem. A, (2009)** “*Modélisation thermique des bâtiments : Evaluation des principaux critères architecturaux et environnementaux*” Master design global, université Henri Poincaré, Nancy.
- Kontossis. A, (1997)** “*l’eau et l’architecture japonaise*” article disponible en ligne sur <http://www.lacambre-archi.be>. consulté, juillet 2011
- Laureano. P, (ND)** “*Wadi villages and sebka villages in the Saharan ecosystem*”ed (John Wiley &sons, Inc (, Hoboken, New Jersey
- Maalouf. C, (2006)** “*Étude du potentiel de rafraîchissement d’un système évaporatif à désorption avec régénération solaire*” thèse de doctorat, université de la Rochelle.
- Moujalled. B, (2007)** “*Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*”, institut des sciences appliquées de Lyon.
- Moukhenachi. S, Brahamia. K, (ND)** “*L’eau, une culture sociale Ksourienne*”. Atelier N°02 : Les droits d’eau : propriété et appropriation symbolique.
- Musy. M, et al, (2012)**, “*Modélisation des interactions ville-climat-énergie*”, article paru dans la revue, Références, Modélisation urbaine : de la représentation au projet. Septembre2012.
- Mutin. G, (2000)** “*De l’eau pour tous*”. La documentation française, d’après world ressource Institute, Paris.
- Novotny. V, Ahern. J, Brown. P, (2005)** “*water centric sustainable communities « planning, retrofitting and building the next urban environment*” ed John Wiley &sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- “*Passive Cooling, Designing natural solutions to summer cooling loads*”, Research & Design. The Quarterly of the AIA Research Corporation Fall, 1979 Volume II, Number 3
- “*Les fontaines de Rome*”. [En ligne] <http://www.liberius.net>
- Prelorenzo. C, Dehan. P, Picon-Lefebvre. V, Simonnet. C, (1993)** “*La Ville Au Bord De L’eau*” Editions parenthèses, Marseille.
- Rabat. N, (1985)** “*The palace of lions, Alhambra and the role of water in its conception*”. Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 2, disponible en ligne sur

[http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=6312](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=6312), consulté février 2011.

**Sadough. H, (2008)** “*A la recherche du paradis*”, Revue de Téhéran N°33. Disponible sur : <http://www.teheran.ir/spip.php?article69> consulté : septembre 2012.

**Sánchez de la Flor. F, Alvarez. S-D, (2004)** “*Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings*”, Elsevier energy and building. Disponible sur: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

**Schimmel. A, (1985)** “*The water of life*”, disponible [En ligne] [http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=4853](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=4853)

**Serrhini. F, (2003).** “*L'eau a Fès, symbole d'une civilisation urbaine*”, Revue H.T.E. N° 126 - Juin 2003.

**Stephano. B, (1985)** “*Fès city of water, gardens and fountains*”, Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 2, disponible en ligne sur [http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=6312](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=6312), consulté février 2011.

**Stierlin. H, (1979)** “*Architecture de l'Islam, de l'Atlantique au Gange*” office du livre, fribourg suisse.

**Supic. P (ND)** “*L'aspect bioclimatique de l'habitat vernaculaire*” Arch. & Comport. / Arch. & Behav., Vol. 10, no 1, p. 27– 47.

**Tebbani. H, (2006),** “*Impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique des espaces urbains publics : cas du cours de la révolution d'Annaba*”, mémoire de magistère, université de, Constantine.

**Timpe. A, (2011),** “*Les eaux de Marktrechwitz, Allemagne*”, contribution à la journée d'étude : Au fil de l'eau et au cœur des villes : la conception de nouveaux espaces urbains en Europe. Organisée par Repères Européens le 27 Janvier 2011.

**Tittlein. P, (2008),** “*Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*”, thèse de doctorat, université de Savoie,

**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 urbain*”, thèse de doctorat, école polytechnique de l'université de Nantes.

**Werquin. A-C, ( )** “*Des Villes Vertes Et Bleues, De Nouvelles Infrastructures A Planifier*” collection « recherches » du PUCA (plan urbanisme construction architecture)



[www.mba.caen.fr](http://www.mba.caen.fr)

**Xanthoulis, S.**, ‘‘*L’eau Facteur d’essor urbain. Instrument de construction d’une nouvelle conscience territoriale*’’ conférence permanente du développement territorial.

**Zeroual, D. (2006)**, ‘‘*Impact des gains de chaleur sur la morphologie des bâtiments cas des climats chauds et arides*’’ mémoire de magistère, université de, Constantine.

**Zia, D. (2011)** ‘‘*Symbolisme de l’eau dans l’œuvre de Mowlânâ*’’, Revue de Téhéran N°26 Disponible sur : <http://www.teheran.ir/spip.php?article69> consulté : septembre 2012.

[http://formation.xpair.com/voirCours/presentation\\_diagramme.htm](http://formation.xpair.com/voirCours/presentation_diagramme.htm)

[http://formation.xpair.com/voirCours/proprietes\\_air\\_diagramme\\_air\\_humide.htm](http://formation.xpair.com/voirCours/proprietes_air_diagramme_air_humide.htm)

<http://fr.wikipedia.org>

<http://www.chateauversailles.fr> consulté février 2013

<http://www.dezeen.com/>

<http://www.japanlivingarts.com/?p=2119>

<http://www.lnr-dz.com>

<http://www.oldukphotos.com>

<http://www.techno-science.net>

<http://www.worldarchitecturemap.org/buildings/water-temple-honpuku-ji>

[http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document\\_id=6312](http://archnet.org/library/documents/one-document.jsp?document_id=6312)

<http://visle-en-terrasse.blogspot.com/2010/07/leau-un-element-darchitecture-ne-pas.html>

# **ANNEXES:**

**ANNEXE I : Exemples d'aménagements d'eau en ville**



Heiner Metzger plaza, new Ulm, Bavaria Source : Dreiseitl et Grau, 2001



Tanner Spring Park, Portland Source : Dreiseitl et Grau, 2001



Town Hall square, Hattersheinx Source: Dreiseitl et Grau, 2001



Heiner Metzger plaza, new Ulm, Bavaria Source :  
Dreiseitl et Grau, 2001



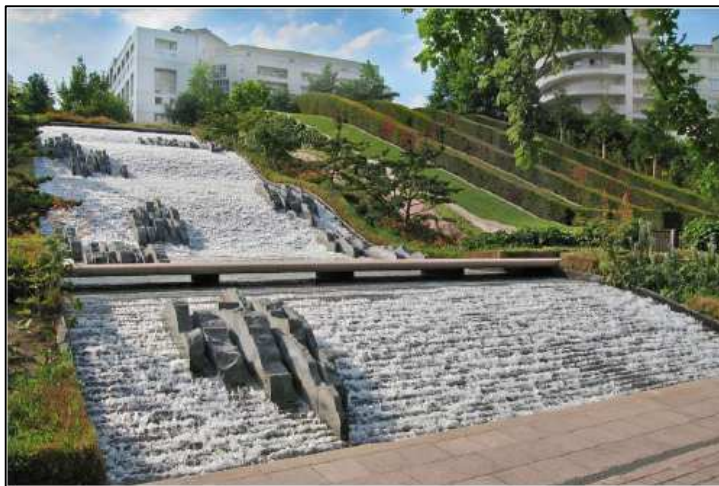
Town Hall square, Hattersheim Source: Dreiseitl et  
Grau, 2001



Les eaux de Marktredwitz, Allemagne, source  
Timpe. A, 2011



Mini jets d'eau, Parc André Citroën  
Source : Ballout. A, 2010.



Cascade artificielle Parc Diderot. Courbevoie, France  
Source : JML, 2008.



Rond-point de l'Europe. La Garenne-Colombes,  
France. Source : JML.2008



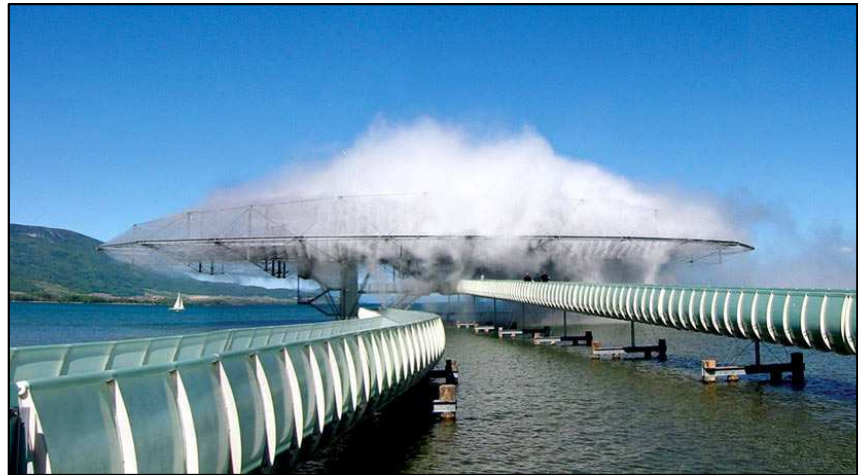
Œuvre de Walker à l'université d'Harvard Source :  
Timpe. A, 2011



The Mall -Cribbs Causeway.Bristol, Royaume-Uni.  
Source: Ballout. A, 2011



Canyon Strate devant le palais des sports de Bercy Source :  
Timpe. A, 2011



Pavillon Blur, construit pour “Swiss Expo 2002”



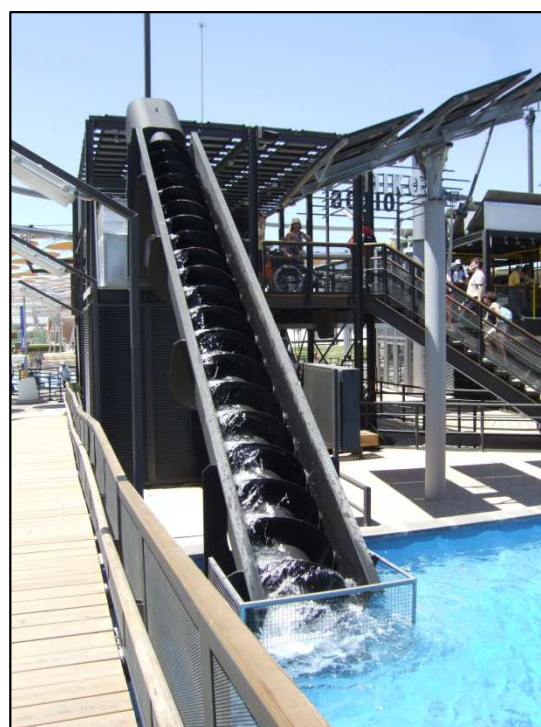
Le pavillon pont: conçu par Zaha hadid pour l'exposition de Saragosse.  
Source : <http://www.college-closdepouilly 21.net>



L'eau en décors : mur d'eau à Séville.



L'eau pour rafraichir. Cascade d'eau.  
Source : exposition-internationale-2008-



L'eau, énergie. Source : exposition-  
internationale-2008-Saragosse



L'eau simulée. Boule en cristal, s'éclairant  
cycliquement comme des gouttes d'eau dans  
l'air. Source : exposition-internationale-  
2008-Saragosse

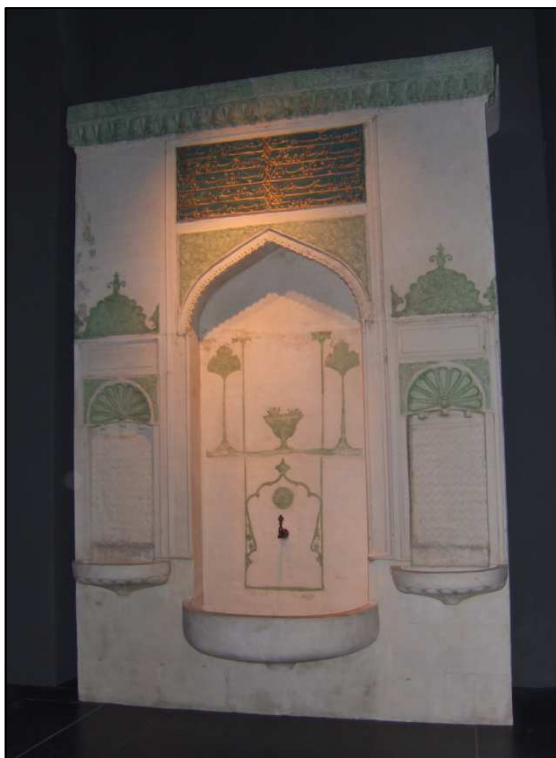




L'eau sculptée. Source : exposition-internationale-2008-Saragosse



Boule en cristal, s'éclairant cycliquement simulant le mouvement d'eau  
Source : exposition-internationale-2008-Saragosse



Fontaine murale. Source : exposition-internationale-2008-Saragosse

---

## **ANNEXE II : Glossaire des concepts utilisés**

### **- Absorption :**

En physique, l'absorption est le Phénomène par lequel un milieu matériel soustrait une partie de leur énergie à des rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires, ou à des vibrations mécaniques.

### **- Adsorption :**

L'adsorption, à ne pas confondre avec l'absorption, est un phénomène de surface par le quel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides des adsorbants.

### **- Chaleur latente :**

(Ou enthalpie) de changement d'état d'une masse ou quantité de matière est la quantité d'énergie qu'il faut lui communiquer pour qu'elle passe de l'état initial (solide, liquide ou gazeux) à un autre état. La valeur de chaleur latente est dépendante de la pression (l'eau par exemple ne bout pas à la même température au niveau de la mer qu'en altitude). Sous la pression atmosphérique la chaleur latente de l'eau est de 333 kJ/kg pour l'eau à 0 °C (c'est à dire qu'au niveau de la mer, il faudra 333Kj pour faire passer 1Kg de glace à l'état liquide).

### **- Chaleur massique :**

Symbolisé par 'C' ou 'S', qu'il convient d'appeler capacité thermique massique. Elle est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance. Elle exprimée en  $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### **- Chaleur sensible :**

Est la quantité de chaleur qui est échangée, sans transition de phase physique, entre plusieurs corps formant un système isolé. Elle est qualifiée de « sensible » parce que cet échange de chaleur sans changement de phase change la température du corps, effet qui peut être senti ou mesuré par un observateur. En cela, la chaleur sensible s'oppose à la « chaleur latente », qui, elle, est absorbée lors d'un changement de phase, sans changement de température.

Les molécules ainsi adsorbées constituant l'adsorbat. Si les conditions énergétiques ou cinétiques permettent à la molécule de pénétrer au sein de la phase absorbante, il y a absorption.

L'adsorption repose sur la propriété qu'ont les surfaces solides de fixer certaines molécules de manière réversible, par des liaisons faibles de type Van der Waals. Cette propriété est liée à la structure même du solide où subsistent, en surface, des forces non équilibrées par suite des

dissymétries dans la répartition des atomes : la formation d'une couche de molécules adsorbées compense en partie ce déséquilibre.

- **Densité :**

La densité d'un matériau est pour les solides et liquides le rapport de masse volumique de ce matériau à celle de l'eau. Pour les gaz, la densité est calculée en rapport avec la masse volumique de l'air.

Elle est un nombre sans unités.

- **Description d'un fluide en mouvement :**

Décrire le mouvement d'un fluide fait appel à des notions différentes de celles développées en Mécanique du point ou du solide. Le mouvement d'un fluide est un écoulement où il y a déformation continue du fluide. On peut, de manière analogue à ce que l'on fait en Mécanique du solide, isoler (par la pensée ou en trouvant un moyen de visualisation, coloration par exemple) une partie restreinte du fluide appelée particule et la " suivre " au cours du temps c'est à dire connaître à chaque instant sa position. Cette position sera connue, par exemple, par ses coordonnées cartésiennes,  $x_p(t, x_{op}, y_{op}, z_{op})$ ,  $y_p(t, x_{op}, y_{op}, z_{op})$ , et  $z_p(t, x_{op}, y_{op}, z_{op})$  où  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $z_p$  représentent les coordonnées de la particule choisie à l'instant  $t_0$ , la vitesse de la particule aura pour composantes  $V_x = \frac{\partial x_p}{\partial t}$ ,  $V_y = \frac{\partial y_p}{\partial t}$  et  $V_z = \frac{\partial z_p}{\partial t}$ . Au cours du temps, la particule sera en différents points M, l'ensemble des points M constitue la trajectoire de la particule. Cette façon de faire est appelée méthode de Lagrange, les variables introduites sont appelées variables de Lagrange. La méthode de Lagrange s'avère dans la plupart des cas délicate car il n'est pas facile de suivre les particules : elle est peu employée.

La **méthode d'Euler** consiste à connaître la vitesse des particules au cours du temps  $t$  à un endroit donné déterminé par ses coordonnées, par exemple cartésiennes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Elle est plus employée que la méthode de Lagrange, la connaissance du champ des vitesses étant suffisante pour la description du fluide en mouvement. Les composantes du vecteur de la vitesse  $\vec{V}$  sont des fonctions des variables  $(x, y, z, t)$ , ainsi  $\vec{V} = V_x \cdot \vec{i} + V_y \cdot \vec{j} + V_z \cdot \vec{k}$  où  $V_x = V_x(x, y, z, t)$ ,  $V_y = V_y(x, y, z, t)$  et  $V_z = V_z(x, y, z, t)$ .

L'écoulement du fluide est **permanent** ou **stationnaire** si ses composantes de vitesse sont indépendantes de la variable temps  $t$  ; il est dit **non-permanent** ou **instationnaire** si cette condition n'est pas réalisée. L'écoulement du fluide est **uniforme** si ses composantes de

vitesse sont indépendantes des coordonnées d'espace ; il est **non-uniforme** si cette condition n'est pas remplie.

**Remarque :** Dans la méthode d'Euler, l'accélération d'une particule peut être due, bien sur, au caractère instationnaire de l'écoulement mais aussi à sa non-uniformité. Ainsi, chacun a pu constater, dans l'écoulement permanent d'une rivière, l'accélération des particules lors du franchissement d'un rétrécissement.

- **Désorption :**

La désorption est le phénomène inverse de l'adsorption et l'absorption : les liaisons ioniques entre ions, molécules et substrat se brisent et les ions ou molécules précédemment adsorbés se détachent du substrat. Phénomène consistant, pour un solide, à abandonner les gaz qu'il a absorbés ou adsorbés.

- **Déssicant :**

Les dessicants sont des matériaux avides d'eau : ils piègent la vapeur d'eau même quand l'atmosphère est très sèche. Les dessicants se présentent sous la forme de granulés ou de billes de quelques millimètres de diamètre.

- **Écoulement laminaire:**

En écoulement laminaire, tous les vecteurs de la vitesse sont parallèles à un instant 't'. Si tous les vecteurs de la vitesse sont à la fois parallèles et égaux, l'écoulement laminaire est uniforme.

- **Écoulement turbulent :**

Les vecteurs des vitesses instantanées sont inégaux (différents en direction, sens, intensité). Des tourbillons se forment. La viscosité du fluide augmente: à la viscosité moléculaire  $\mu$  s'ajoute une viscosité de turbulence  $n$ .

- **Fluides Compressibles ou fluides Incompressibles :**

Un fluide est dit incompressible lorsque sa masse volumique ne dépend pas (pratiquement pas) de la pression ou de la température. Généralement, en Statique des fluides, les liquides sont considérés comme incompressibles et les gaz sont compressibles.

Pour un fluide en écoulement, ce classement est infirmé dans un certain nombre de situations importantes :

- Pour les gaz et pour les liquides, des gradients de température décroissant avec l'altitude provoquent des mouvements ascensionnels de matière (convection naturelle)

qui ont pour conséquence d'homogénéiser la température ; ces mouvements ne peuvent s'expliquer sans considérer des variations de masse volumique,

- Dans les gaz et les liquides, des perturbations de pression donnent naissance à des phénomènes de propagation (onde sonore) qui ne peuvent être expliqués sans la notion de compressibilité,
- L'approximation fluide incompressible est souvent justifiée pour un gaz s'écoulant, dans un plan horizontal, jusqu'à des vitesses égales au tiers de la vitesse du son égale à 340 m/s pour l'air dans les conditions courantes.

Ainsi c'est la nature de l'écoulement qui permet de distinguer l'écoulement compressible de l'écoulement incompressible et non la nature du fluide. On emploie l'expression *hydrodynamique* pour qualifier un écoulement incompressible sans qu'il soit nécessaire que le fluide soit de l'eau ou un liquide et l'expression *aérodynamique* pour qualifier l'écoulement d'un fluide compressible sans qu'il soit nécessaire que ce fluide soit de l'air ou un gaz.

- **Fontaine :**

Une fontaine est une construction -généralement accompagnée d'un bassin- d'où jaillit de l'eau. Une fontaine peut être naturelle au sens d'être alimentée par une source.

Les fontaines ont été un des facteurs d'hygiène, en limitant le risque de choléra ou de maladies véhiculées par les puits risquant d'être contaminés par les excréments et eaux usées. Certaines fontaines jouaient aussi le rôle d'abreuvoir.

L'eau qui coule, le bruit du jet d'une fontaine avait la réputation d'apaiser celui qui l'entendait. Les recherches ont démontré que ce bruit constituait un véritable antistress.

- **Jet d'eau :**

Gerbe d'eau jaillissant verticalement. Le jet d'eau, se distingue de l'eau par son débit élevé et son hauteur qui peut atteindre des centaines de mètres.

- **Masse volumique :**

Pour toute substance homogène ; la masse volumique est le rapport d'une masse 'm' correspondant à un volume 'v' de cette même substance.

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ Son unité de mesure est kg/m}^3.$$

La masse volumique dépend de la température et la pression, elle peut être vérifiée algébriquement comme il suit :

L'air est considéré comme un gaz parfait c'est à dire un milieu fluide qui tend à occuper tout le volume du récipient qui le contient. Nous pouvons alors poser l'équation des gaz parfaits permettant de relier, la pression, la température et le volume d'un gaz parfait contenu dans un récipient :

$$p.V = n.R.T \text{ Ou}$$

$$V = \frac{n.R.T}{p}$$

Soit  $\rho$  la masse volumique :  $\rho = \frac{m}{V}$

En remplaçant  $V$  dans cette expression, on obtient :

$$\rho = \frac{m.p}{n.R.T}$$

avec :  $\rho$  est la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )

- $m$  est la masse (kg)
- $n$  est la quantité de matière (en  $\text{mol}$ )
- $P$  est la pression atmosphérique à l'altitude  $z$  (en  $\text{Pa}$ )
- $R$  est la constante des gaz parfaits ( $R = 8,31 \text{ SI}$ )
- $T$  est la température en degré **Kelvin** :  $T(K) = t(\text{degrs celsius}) + 273,5$

or,

$$M = \frac{m}{n}$$

$$M = 28,9644 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$M$  est la masse molaire de l'air sec :

donc on obtient l'égalité :

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T} = \frac{M}{R} \cdot \frac{p}{T} = \frac{3,485 \cdot p}{T}$$

Nous venons alors de vérifier que la masse volumique varie avec la pression atmosphérique et avec la température de l'air.

- **Viscosité :**

La viscosité détermine la vitesse de mouvement du fluide (par exemple, la vitesse de déplacement d'une cuillère dans un bol: plus le liquide est visqueux, plus le mouvement est lent). L'addition d'une faible quantité de substance en suspension ou en solution peut augmenter grandement la viscosité du liquide. La viscosité moléculaire est désignée par 'μ'; elle est exprimée en 'N.s.m-2'. Les liquides ont une viscosité supérieure à celle des gaz: les molécules sont plus rapprochées, des liaisons s'établissent entre elles qui augmentent la cohésion de l'ensemble. La viscosité varie en sens inverse de la température. La viscosité cinématique 'ν' est égale au rapport de la viscosité moléculaire du fluide sur sa densité.

تعرف المدن الكبرى خلال الفترات الصيفية تفاقماً لبعض المشاكل المرتبطة بظاهرة ” جزيرة الحرارة الحضرية“ كالتلوث والاستهلاك المفرط للطاقة من اجل التبريد. ويعد استبدال الغطاء النباتي, المساحات المائية والمناطق الرطبة بالأسطح المعدنية والإسفلت والخرسانة من اهم الاسباب المساهمة في تزايد هذه المشكلة.

التأثير المباشر وغير المباشر للتجهيزات الحضرية ، على الرغم من أنه غالباً ما يتم تجاهله ، يمكن ان يكون من اهم الحلول التي تسمح بالتقليل من استهلاك الطاقة من اجل التعديل الحراري . وجود الغطاء النباتي ، النوافير والأسطح المائية، يمكن أن يعمل على تعديل الظروف المناخية من أجل خفض الإجهاد الحراري خلال الفترات الصيفية. كما يتسم هذا النوع من الحلول بالطابع صحي.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو التقييم الكمي لمدى تأثير وجود التجهيزات المائية كالنافورة مثلاً، على تحسين الظروف المناخية في المناطق ذات مناخ حار وجاف. وامتداد هذا التغير على استهلاك الطاقة في البنايات.

تطور هذه الاطروحة متعلق بثلاث عناصر اساسية: الماء ، كعنصر من الطبيعة ، طاقة متجددة والذي يمكن ان يكون اداة من ادوات التهيئة الحضرية. البناية; كنظام معقد هدفه ضمان الظروف الملائمة لراحة مستعمليه. وأخيراً العوامل المناخية: حيث نحاول من خلال هذه الدراسة اختبار مدى تأثير العامل الاول (الماء) على العوامل المناخية والتي من شأنها ان تحسن بدورها شروط الراحة داخل البناية.

من اجل ذلك ينقسم البحث الى جزئين اساسيين: الاول يتمثل في مساهمة ببليوغرافية تتناول كلا من العناصر الثلاثة المذكورة أعلاه. اما الثاني فيشكل مساهمتنا الشخصية في هذه الدراسة, حيث نقوم بعمليات محاكاة لمجال عمراني مبسط باستعمال برنامج فلونت Ansys fluent. والتي تمكننا من اجراء مجموعة من سيناريوهات مقارنة ، يتم من خلالها تقييم التحسن الذي يمكن ان يحدث بوجود التجهيز المائي ، من جهة: للعوامل المناخية. ومن جهة اخرى امتداد هذا التأثير للبناية الممتلئة في غلافها الخارجي الذي يشكل الحدود مع المجال الداخلي ويهدف الى توفير ظروف حرارية ملائمة لمستعمليه.

**الكلمات المفتاحية :** المياء ، البناء ، درجة الحرارة ، الرطوبة النسبية ، نظام ، الراحة الحرارية، التبريد السلبي.



Big cities develop increasingly certain problems involved in ‘‘Urban Heat Island’’, like the peaks of pollution and the energy overconsumption due to air-conditioning. The mineralization of the cities, by replacing the vegetation and wetlands by concrete and asphalt, contributes to these harmful effects.

The direct and indirect impact of urban features, although it is often overlooked, is an interesting way to reach a passive energy regulation. The presence of vegetation, fountains, water surface, allows to acting on the climatic context in order to reduce the thermal stress of summer. This Solution presents also a healthy and fair character.

The objective of our study, is to evaluate the improvement, that provides the water bodies on the climatic conditions and consequently on energy consumption on the level of the buildings.

The developpement of our manuscript depend on three basic components; water as an element of nature, energy and landscape tool, building, as a complex system, which ensure conditions of well -being for its occupants, and at last climatic conditions. We have to evaluate the effect of the water bodies, in reducing temperature and moisture bear the building envelope.

In order to carry out this process of evolution, our study is divided into two principal parts. The first constitute a scientific review which treats each one of the three components mentioned above. The second constitutes our personal contribution in this research. Modeling of simplified urban scenes with AnsysFluent, enabled us to establish several scenarios of comparison. Through which we aimed to evaluate the improvement observed of the climatic condition in presence of device of water, and the extent of this influence on the building through its envelope which encloses it and has as finality to provide comfortable conditions for the occupants.

**Key words:** Water, Buildings, Temperature, relative humidity, system, comfort, passive cooling.