

**Université Mouloud MAMMERY TIZI OUZOU**

**Faculté du Génie de la Construction**

**Département d'Architecture**

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

**Spécialité : Architecture**

**Option : Architecture et développement durable**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> ZERMOUT Ratiba**

### **Utilisation de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment**

**Devant le jury composé de :**

M.DAHLI Mohamed	Maître de conférences « A »	UMMTO	Président
M. MAKHLOUF Said	Maître de conférences « A »	UMMTO	Rapporteur
Mme BOUSSOUALIM Aicha	Maître de conférences « A »	EPAU	Examinatrice
M.CHENAK Abdelkrim	Chargé de recherche	CDER Alger	Examineur
M.LAMROUS Nacer	Chargé de recherche	ENPI Rouiba	Invité

**Soutenu le 30 juin 2011**

## Remerciements

J'aimerais exprimer tout particulièrement ma gratitude à mon encadreur Monsieur MAKHLOUF Saïd, pour ses orientations, ses encouragements, sa disponibilité, pour sa générosité intellectuelle, sa patience et pour ses nombreux conseils tout au long de l'avancement de mon mémoire.

Merci à Monsieur DAHLI Mohamed, Maître de conférences « A » à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou d'avoir accepté d'être le président de jury et d'avoir lu le document.

Merci à Madame BOUSSOUALIM Aïcha, Maître de conférences « A » à l'EPAU d'Alger, d'avoir accepté à participer à mon jury de soutenance, d'avoir lu le document et d'être examinatrice de mon travail.

Merci à Monsieur CHENAK Abdelkrim, chargé de recherche au CDER à Bouzaréah d'avoir accepté à participer à mon jury de soutenance, d'avoir lu le document et d'être examinateur de mon travail.

Merci à Monsieur LAMROUS Nacer, chargé de recherche à ENPI Rouiba d'avoir accepté à participer à mon jury de soutenance et d'avoir lu le document.

Un grand merci à Madame MASNOUA Karima, Monsieur AIT AISSA Hocine et Monsieur BOUYAHIAOUI Ali, Monsieur YAKOUBEN El Manaa pour leur soutien moral.

Un grand merci à mon médecin Docteur AIT AISSA Mohamed Cherif pour ses précieux conseils.

Un très grand merci à mes amis (es) particulièrement : KESRAOUI Nadia, BENHAMOUCHE Ratiba, LALEG Nesrine, BOUYAHIAOUI Amina, TADJER Aziz, HAMDAD Habiba et BADACHE Ramdane, SID AHMED Nabila, ZAIDAT Youcef, MOKRANI Abdennour,... Ainsi que tous ceux que j'ai omis de citer.

Je tiens à remercier également toute l'équipe de la bibliothèque de l'EPAU, l'équipe de bibliothèque de l'habitat, l'équipe de bibliothèque de département du génie mécanique pour leurs accueils chaleureux, leurs patiences et avoir donné la possibilité d'accéder à la documentation.

Enfin, je remercie de tout cœur mes parents pour leurs encouragements constants et à ma très chère famille et surtout mon frère Khaled et mes sœurs Soraya, Hanane et Amel, Yasmine et mon neveu Yannis.

## Résumé

Le développement de la climatisation lié à l'amélioration des conditions de vie entraîne l'augmentation de la consommation énergétique avec tous ses effets néfastes sur l'environnement. Il est donc urgent de trouver des solutions alternatives à la climatisation conventionnelle à faibles impacts environnementaux, tirées en grande partie des principes de l'architecture bioclimatique qui vise particulièrement l'amélioration du confort et minimise le recours aux énergies non renouvelable, tout en restant cohérente avec la stratégie de développement durable. Dans ce cas, nous proposons le concept de rafraîchissement inertiel par le sol, appelé communément le geocooling ou puits provençal. Il s'agit d'une application géothermique de surface qui utilise de manière passive l'énergie présente dans le sol adjacent, dont l'Algérie se dispose d'un potentiel inépuisable en cette matière, que nous sommes en mesure d'exploiter. Ce concept consiste à utiliser l'inertie thermique du sol pour rafraîchir l'air extérieur par le biais d'un échangeur air /sol, composé de tubes enterrés reliés au système de ventilation contrôlée du bâtiment. Il est pensé comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci, et ce, avec une intégration soignée du concept énergétique qui doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes. Cette technique constitue une solution alternative éprouvée qui contribue davantage à l'économie d'énergie et la préservation de l'environnement.

Notre travail de recherche consiste à étudier le potentiel de rafraîchissement par puits provençal développé dans un modèle numérique, implémenté dans un environnement modulaire. Les simulations réalisées, adaptées à une maison individuelle située dans un lotissement résidentiel au Sud Ouest de la ville de Tizi-Ouzou, ont permis d'étudier l'interaction entre cette installation et le bâtiment objet de cas d'étude.

**Mots clés :** développement durable, architecture bioclimatique, la géothermie de surface, l'économie d'énergie, le confort thermique, la climatisation conventionnelle, le rafraîchissement passif, l'inertie thermique, la ventilation, le geocooling, puits provençal, échangeur air/ sol, simulation numérique.

## Abstract

The development of air conditioning related to the improvement of living conditions results in an increase in energy consumption with all its adverse effects on the environment. It is therefore urgent to find alternatives to conventional air conditioning with low environmental impact, drawn largely from principles of bioclimatic architecture designed specifically to improve the comfort and minimizes the use of non-renewable energy, while remaining consistent with the sustainable development strategy. In this case, we propose the concept of inertial cooling by the ground, commonly called the geocooling. This geothermal application uses passively the surface temperature of the soil (geothermic energy), which Algeria has an inexhaustible potential in this area. The concept is to use the thermal inertia of the ground to for cooling the indoor air for building by means of earth-to-air heat exchanger composed of buried pipes at a certain depth, connected to the ventilation system controlled the building. It is designed as an integral part of the building and not as a system to add to it, and that, with careful integration of the energy concept which must necessarily include the building (inertia, shading) and the management of internal gains. This technique constitutes a tested alternative solution that contributes more to energy saving and environmental protection.

Our research task consists in studying the potential of geocooling developed in a numerical model, implemented in a modular environment. The simulations adapted to a house located in a residential subdivision in the South West of the city of Tizi-Ouzou, allowed to study the interaction between have this facility and the building subject of case studies.

**Key words:** sustainable development, bioclimatic architecture, the geothermic of surface, the energy saving, thermal comfort, conventional air-conditioning, passive cooling, thermal inertia, ventilation, the geocooling, the earth to air heat exchanger, thermal simulation.

## ملخص البحث

إن تطوير مكيفات التبريد الهوائية المستعملة لتحسين الظروف المعيشية بات من أكبر المستهلكين للطاقة بما في ذلك اثرها السلبي على البيئة. و على اثر ذلك ، فإن الحاجة ملحة لإيجاد الحلول البديلة لمكيفات التبريد التقليدية ، محافظة للبيئة، مستمدة من مبادئ العمارة البيومناخية و التي تستهدف بصفة خاصة تحسين الرفاهية الحرارية للإنسان و التقليل من استعمال الطاقات الغير متجددة، و التي تتوافق مع استراتيجية التنمية المستدامة. في هذه الحالة، نقترح فكرة التبريد الطبيعي عن طريق الأرض المعروف باسم الجيوتبريد، الذي يستغل الحرارة السطحية للأرض بطريقة طبيعية، و التي تحوي الجزائر على مخزون هام و الذي يستوجب علينا استغلاله. الفكرة تتمثل في استغلال خاصية التسريب الحراري ببطئ من اجل تبريد الهواء عن طريق محول حراري هواء/ أرض ، المتكون من أنابيب مدفونة ، مستقبل للهواء خارجي، مستقبل للهواء المعالج الذي يوصل الى جهاز التهوية الميكانيكية المراقبة. يجدر اعتباره كعنصر متجانس في العمارة و ذلك بادماج عنصر الطاقة و التي تأخذ بعين الاعتبار كل مكونات العمارة بما فيها الخاصيات الترموفيزيائية للغلاف الخارجي للبنائية، الحماية من الاشعاعات الشمسية و تسيير الحرارة المنبعثة من الالات الكهرومنزلية ، الانارة و الانسان. هذه التقنية تعتبر حل بديل معترف به، و الذي يساهم بطريقة فعالة في تحقيق اقتصاد في الطاقة و المحافظة على البيئة.

هذا العمل ، يقترح دراسة امكانية التبريد عن طريق المحول الحراري هواء/أرض ، و ذلك باستعمال برنامج معلوماتي الذي يدرس العلاقة: تقنية الجيوتبريد – العمارة المتواجدة في مدينة تيزي وزو.

**مفاتيح البحث:** التنمية المستدامة، العمارة البيومناخية، الحرارة السطحية للأرض، الرفاهية الحرارية، مكيفات الهواء التقليدية، التبريد الطبيعي، التهوية، الجيوتبريد، محول حراري هواء/أرض، تطبيق رقمي.

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>Résumé</b> .....	ii
<b>Abstract</b> .....	iii
<b>Table des matières</b> .....	v
<b>Table des figures</b> .....	x
<b>Liste des tableaux</b> .....	xiv
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>I-Contexte, problématique et objectifs de la recherche</b>	
I-1- Introduction.....	4
I-2- Contexte général de la recherche.....	4
I-2-1- Le contexte énergétique global.....	4
I-2-1-1- Perspective de consommation pour le Secteur tertiaire.....	6
I-2-1-2- Perspective de consommation pour le Secteur résidentiel.....	6
I-2-1- 3-Contribution du bâtiment à la consommation d'énergie en Algérie .....	9
I-2-2- Contexte climatique et la climatisation dans le bâtiment.....	11
I-2-3-L'ilot de chaleur urbain et le besoin de climatisation.....	14
I-2-4- Les engagements internationaux .....	19
I-2-4-1- Le protocole de Montréal .....	20
I-2-4- 2-Le protocole de Kyoto.....	20
I-2-5- Confort thermique - énergie et climatisation.....	20
I-2-5-1-Aspects subjectifs du confort thermique et climatisation.....	21
I-3- La problématique de recherche.....	23
I-4- Les hypothèses.....	24
I-5- Les Objectifs.....	25
I-6- La démarche de travail.....	25
<b>II- L'énergie dans le bâtiment, au cœur de la stratégie de développement durable</b>	
II-1- Introduction.....	28
II-2- Les enjeux de développement durable pour l'énergie.....	28
II-2-1-Aperçu historique sur le concept de développement durable.....	28
II-2-2-Définition du concept de développement durable.....	31
II-2-3- Le développement durable et énergie.....	32
II-2-4- Les développement durable et bâtiment.....	32
II-2-4-1- Le recours aux énergies renouvelables.....	33

II-2-4-2- Le choix des matériaux, l'inertie et de l'isolation.....	35
II-2-4-2-1-Le choix des matériaux « matériaux durables » .....	35
II-2-4-2-2-L'inertie de l'enveloppe du bâtiment.....	36
II-2-4-2-2-1- principe de l'inertie thermique.....	36
II-2-4-2-2-2- Les paramètres affectant la performance de l'inertie de l'enveloppe.....	38
II-2-4-2-2-3- Exemple d'application de l'inertie thermique.....	39
II-2-4-2-3- Les matériaux isolants « isolation durable ».....	42
II-2-4-2-3-1- Le principe de l'isolation thermique.....	42
II-2-4-2-3-2- Les isolants thermiques.....	43
II-2-4-2-3-3- L'effet des ponts thermiques.....	44
II-2-4-2-3-4- L'application de l'isolation.....	45
II-2-4-2-3-5- L'emplacement de l'isolation.....	46
II-2-4-2-3-6- Isolation et inertie.....	47
II-2-4-2-3-7-L'isolation et l'économie d'énergie.....	48
II-2-4-3-L'architecture bioclimatique.....	49
II-2-4-3-1- stratégie de chaud.....	50
II-2-4-3-1-1-Le Captage.....	50
II-2-4-3-1-2-Le stockage.....	52
II-2-4-3-1-3-La Conservation.....	52
II-2-4-3-1-4-La Distribution.....	52
II-2-4-3-2- stratégie de froid.....	53
II-2-4-3-2-1-Limiter les apports thermiques solaires.....	53
II-2-4-3-2-2-Minimiser les apports internes .....	57
II-2-4-3-2-3-Dissiper les surchauffes .....	57
II-2-4-3-2-4-Refroidir les locaux.....	58
II-3- Le concept de performance énergétique du bâtiment au cœur de la stratégie de maîtrise d'énergie.....	59
II-3-1-Définition du concept.....	59
II-3-2-Typologie des bâtiments performants.....	59
II-4- les enjeux de développement durable pour l'énergie En Algérie.....	63
II-4-1- Le cadre législative.....	63
II-4-2-Le Potentiel National en énergies renouvelables.....	67
II-4-2- 1-Potentiel Solaire.....	67
II-4-2- 2-Potentiel Eolien.....	68
II-4-2- 3-Potentiel Géothermique.....	68

II-4-2- 4-Potentiel de la forêt.....	70
II-4-3-La prise en charge du secteur du le bâtiment en Algérie, dans le cadre de cette Politique.....	70
II-5-Conclusion .....	71
<b>III- La géothermie une énergie pour le développement durable au service du bâtiment</b>	
III-1- Introduction.....	71
III-2-Généralité sur la géothermie.....	72
III-2-1-Originine de la chaleur terrestre.....	72
III-2-2-Gisements géothermiques.....	74
III-2-2-1-La géothermie haute température haute température ( $T > 150\text{ C}^\circ$ ).....	74
III-2-2-2-La géothermie moyenne température.....	75
III-2-2-3-La géothermie basse énergie ( $30\text{ C}^\circ < T < 100\text{ C}^\circ$ ) .....	75
III-2-2-4-La géothermie très basse énergie.....	75
III-2-3-Les principaux types de ressources géothermiques.....	75
III-2-3-1-Réservoirs de vapeur .....	75
III-2-3-2-Réservoirs d'eau chaude .....	76
III-2-3-3-Les gisements de roches chaudes sèches .....	76
III-2-3-4-Les stockages saisonniers (en surface).....	76
III-3- les caractéristiques de la géothermie.....	76
III-3-1- La disponibilité de la géothermie.....	76
III-3-2- L'indépendance de la géothermie aux conditions climatiques.....	77
III-3-3- La géothermie et l'environnement.....	77
III-3-4- La géothermie le cout d'investissement et d'exploitation.....	77
III-3-5- La géothermie et les énergies renouvelable.....	78
III-4-Utilisation de la géothermie.....	78
III-4-1- Développement historique.....	78
III-4-2- Les diverses applications de la géothermie.....	79
III-4-3- Les applications de la géothermie basse et très basse température pour répondre aux besoins thermique (chauffage – climatisation) dans le bâtiment.....	80
III-4-3-1- La géothermie basse énergie.....	80
III-4-3-2- La géothermie très basse énergie.....	81
III-5-La géothermique dans le monde.....	83
III-5-1-La production de chaleur.....	83
III-5-2-La production d'électricité.....	84

III-6-La géothermie en Algérie.....	85
III-6-1- L'état e la recherche .....	85
III-6-2-Exploitation de la géothermie en Algérie .....	87
III-7- Conclusion .....	88
<b>IV- Le géo cooling, une réponse thermique du bâtiment et intégration de techniques de rafraîchissements passives</b>	
IV-1-Introduction.....	89
IV-2- Modes de transfert de chaleur.....	90
IV-3- Le confort thermique estival.....	91
IV-3-1-L'équilibre thermique du corps humain, source du confort.....	91
IV-3-1-1-Le métabolisme.....	91
IV-3-1-2-L'habillement.....	92
IV-3-1-3-La température du corps.....	92
IV-3-1-4-La température ambiante.....	92
IV-3-1-5-La température des parois.....	92
IV-3-1-6-L'humidité relative de l'air.....	93
IV-3-1-7-La vitesse de l'air.....	93
IV-3-2-Characterisation d'une ambiance chaude.....	94
IV-3-3-Qualification globale d'une ambiance.....	95
IV- 4- Les paramètres affectant la température ambiante intérieure.....	96
IV-4-1-Le climat de l'Algérie.....	96
IV-4-1-1-Zonage climatique.....	97
IV-4-3-L'effet des paramètres du climat sur la température d'une ambiance intérieure.....	99
IV-4-3-1-Le rayonnement solaire.....	99
IV-4-3-1-1-Le rayonnement terre - soleil.....	99
IV-4-3-1-2-Le mouvement apparent du soleil.....	103
IV-4-3-1-3-Le calcul du rayonnement solaire hors atmosphère.....	104
IV-4-3-1-4-L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	105
IV-4-3-1-5-Le calcul du rayonnement solaire global reçu par une surface.....	109
IV-4-3-2-La température .....	120
IV-4-3-2-1-La température de l'air extérieure.....	120
IV-4-3-2-3-L'influence de l'environnement sur la température.....	121
IV-4-3-3- Le vent .....	124
IV-4-3-3- 1-les indicateurs du vent.....	124

IV-4-3-3- 2-Les caractéristiques du vent.....	124
IV-4-3-4-L'humidité relative.....	130
IV-4-4-Les apports internes.....	132
IV-4-5-Les effets thermiques de l'enveloppe sur la température d'une ambiance intérieure.....	132
IV-5-Le puits canadien ou provençal et son intégration dans le bâtiment.....	135
IV-5-1- Les origines de la technique.....	138
IV-5-2- Le principe de fonctionnement.....	140
IV-5-3-Analyse et état de l'art.....	141
IV-5-3-1-Analyse des documents : expérimentation de l'INSA de Toulouse.....	141
IV-5-3-2-Expérimentation de l'Ariège.....	144
IV-5-3-3-Expérimentation de Castanet.....	145
IV-5-3-4-INSA : les puits provençaux : « étude et méthode de dimensionnement ».....	145
IV-5-3-5-Outil de calcul de l'échangeur thermique: air/ GAEA.....	146
IV-5-3-6-Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : Mesure in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique.....	147
IV-5-3-7- rafraichissement et préchauffage par tubes enterrés .....	148
IV-5-3-8-Stockage de chaleur dans le sol.....	149
IV-5-4- Caractéristiques physiques du puits provençal.....	149
IV-5-4-1-Caractéristiques thermique du sol.....	150
IV-5-4-2-Les propriétés physiques du tube.....	153
IV-5-4-3-Les caractéristiques du flux d'air.....	155
IV-5-4-4-Echange convectif air/tube.....	156
IV-5-5- Modélisation et dimensionnement d'un puits provençal.....	157
IV-5-5-1-Structure du modèle thermique de sol.....	158
IV-5-5-3-Distributeur et collecteur.....	173
IV-5-5-4-Ventilateur.....	174
IV-5-5-5-Coûts.....	175
IV-5-6-Les précautions d'usage.....	175
IV-5-6-1-La gestion des condensats et des infiltrations d'eau.....	176
IV-5-6-2-La qualité de l'air.....	176
IV-5-6-3-Les risques liés au radon.....	177
IV-5-6-4-Les matériaux.....	177
IV-5-6-5-Régulation.....	177

IV-6- Conclusion .....	178
<b>V- Le cas d'étude cas d'étude « le dimensionnement d'un puits provençal et la vérification de son efficacité à l'aide d'un outil de simulation pour maison individuelle à Tizi Ouzou</b>	
V-1 Introduction.....	180
V-2- Les paramètres de modélisation du puits provençal.....	180
V-2-1- Les paramètres du site.....	181
V-2-1-1- Situation de la ville de Tizi Ouzou.....	181
V-2-1-2- Caractéristiques climatiques du site.....	182
V-2-1-2-1- La température de l'air.....	182
V-2-1-2-2- La vitesse de l'air.....	183
V-2-1-2-3- L'humidité relative.....	183
V-2-1-2-4- Précipitation.....	184
V-2-1-2-5- L'ensoleillement.....	184
V-2-1-3- Analyse bioclimatique du site.....	185
V-2-1-3-1- Le diagramme psychrométrique de Givoni.....	186
V-2-1-3-2- Tableau de Mahoney .....	187
V-2-2- Modélisation du bâtiment étudié.....	188
V-2-2-1- Configuration spatiale du cas d'étude.....	188
V-2-2-2- Configuration géométrique et système constructif du cas d'étude.....	189
V-2-2-3- Caractéristique de l'enveloppe .....	189
V-2-2-4- Les équipements.....	190
V-2-2-5- Renouvellement de l'air.....	191
V-2-2-6- La stratégie d'occupation.....	191
V-2-2-7- L'évolution de la température à l'intérieure de la maison.....	191
V-2-2-7-1- Mesure des températures moyennes extérieures et intérieures.....	192
V-2-2-7-1-1- Mesures de températures sèches.....	192
V-2-2-7-1-2- Mesures de températures humides.....	193
V-2-2-7-1-3- Les caractéristiques de thermique de l'ambiance (diagramme psychrométrique)...	194
V-2-2-7-1-4- L'interprétation des résultats de la campagne de mesure.....	194
V-2-3- La modélisation thermique du sol.....	196
V-2-3-1- Conductivité thermique du sol.....	196
V-2-3-2- Nature de la surface du sol.....	197
V-2-3-3- Humidité à la surface du sol.....	197
V-2-4- Les caractéristiques du tube.....	199

V-3-La simulation .....	199
V-4-Les résultats de simulation.....	200
V-5- Conclusion.....	202
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>203</b>

**Bibliographie**

**Annexe 01:** Tables de Mahoney

**Annexe 02 :** programme Scilab

## Table des figures

### Chapitre I

<b>Figure I-01</b> : L'évolution de la consommation d'énergie.....	5
<b>Figure I-02</b> : consommation énergétique dans différents secteurs économiques.....	6
<b>Figure I-03</b> : Consommation mondiale d'énergie finale dans le secteur tertiaire.....	6
<b>Figure I-04</b> : Consommation mondiale d'énergie finale dans le secteur Résidentiel.....	7
<b>Figure I-05</b> :consommation énergétique pour la climatisation dans le bâtiment.....	7
<b>Figure I-06</b> :Le marché de climatisation dans le monde.....	8
<b>Figure I-07</b> : Consommation finale par secteur (évaluée en 2005 à 24,437 millions TEP).....	9
<b>Figure I-08</b> : Evolution de la Consommation énergétique du Secteur Résidentiel.....	10
<b>Figure I-09</b> : Evolution de la Consommation énergétique du Secteur tertiaire.....	11
<b>Figure I-10</b> : Evolution des émissions de HFC.....	13
<b>Figure I-11</b> : Climat urbain et réchauffement climatique.....	14
<b>Figure I-12</b> : Structure de la couche limite urbaine et la canopée urbaine.....	15
<b>Figure I-13</b> : Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de Climatisation.....	18

### Chapitre II

<b>Figure II-01</b> : Grandes dates du développement durable.....	31
<b>Figure II-02</b> : Les trois piliers du développement durable.....	31
<b>Figure II-03</b> : le déphasage et l'amplitude de l'onde incidente par une paroi homogène.....	37
<b>Figure II-04</b> : le temps de déphasage de divers matériaux de construction en onction de l'épaisseur et de l chaleur accumulée.....	38
<b>Figure II-05</b> : l'architecture troglodytique « matmata » en tunisie.....	40
<b>Figure II-06</b> : l'usage de matériaux locaux ( la pierre) au Yémen.....	41
<b>Figure II-07</b> : architecture de l'igloo.....	41
<b>Figure II-08</b> : pertes thermique à travers une maison non isolée.....	42
<b>Figure II-09</b> : les ponts thermiques.....	45
<b>Figure II-10</b> : profile des temperature avec ventilation.....	48
<b>Figure II-11</b> : principe de l'architecture bioclimatique.....	50
<b>Figure II-12</b> : principe de l'architecture bioclimatique pour le chauffage.....	50
<b>Figure II-13</b> : le mur trombe.....	51
<b>Figure II-14</b> : système steve Baer à boucle de convection.....	52
<b>Figure II-15</b> : système Barra Constantini.....	52
<b>Figure II-16</b> : Espace solaire.....	53
<b>Figure II-17</b> : principe de l'architecture bioclimatique pour le rafraichissement.....	54

<b>Figure II-18:</b> Types de protections solaires.....	54
<b>Figure II-19 :</b> Protections solaires fixes.....	56
<b>Figure II-20 :</b> Protections solaires mobile.....	57
<b>Figure II-21 :</b> Protections solaires saisonieres.....	57
<b>Figure II-22 :</b> ventilation naturelle par effet thermosiphon.....	58
<b>Figure II-23 :</b> ventilation naturelle par effet du vent.....	59
<b>Figure II-24 :</b> Tour à vent pour refroidissement passif dans l'architecture iranéenne.....	60
<b>Figure II-25 :</b> L'énergie solaire en Algérie.....	68
<b>Figure II-26 :</b> L'énergie Eolienne en Algérie.....	69
<b>Chapitre III</b> .....	
<b>Figure III- 01 :</b> structure interne de la terre.....	74
<b>Figure III- 02 :</b> Gisement géothermique.....	75
<b>Figure III- 03 :</b> les exploitations géothermiques.....	80
<b>Figure III- 04 :</b> Capteur géothermique horizontal.....	81
<b>Figure III- 05:</b> Sonde géothermique verticale.....	82
<b>Figure III- 06 :</b> Schéma de puits canadien (exploitation géothermique très basse température).....	83
<b>Figure III- 07 :</b> les principales applications geothermique pour la production de chaleur .....	85
<b>Figure III- 08:</b> Les installations geothermique pour la production d'électricité.....	86
<b>Figure III- 09 :</b> Carte de température des sources thermales du nord de l'Algérie.....	87
<b>Figure III- 10:</b> zones géothermique préférentielles et potentiel à l'exhaure.....	88
<b>Chapitre IV</b> .....	
<b>Figure IV-1 :</b> les échanges thermiques du corps avec l'environnement.....	92
<b>Figure IV-2 :</b> Les échanges thermiques de l'homme avec son environnement.....	95
<b>Figure IV 3 :</b> la qualification d'une ambiance thermique .....	97
<b>Figure IV-4 :</b> Coupe transversale Nord-Sud du relief .....	98
<b>Figure IV-5:</b> Zones climatiques d'Hiver.....	101
<b>Figure IV-6:</b> Zones climatiques d'Eté.....	102
<b>Figure IV-7 :</b> mouvement de la terre autour du soleil.....	103
<b>Figure IV-8 :</b> Coordonnées terrestre.....	104
<b>Figure IV-9 :</b> L'angle horaire du soleil.....	106
<b>Figure IV-10 :</b> coordonnées angulaires du soleil.....	107
<b>Figure IV-11 :</b> Absorption atmosphérique du rayonnement solaire.....	109
<b>Figure IV-12:</b> le diagramme d'extinction atmosphérique.....	111
<b>Figure IV-13 :</b> Le trouble atmosphérique pour Tizi Ouzou.....	113
<b>Figure IV-14 :</b> Bilan radiatif terrestre .....	113

<b>Figure IV-15:</b> rayonnement solaire global reçu par une surface horizontal.....	117
<b>Figure IV-16 :</b> rayonnement solaire global reçu par une façade orienté vers l'Est.....	120
<b>Figure IV-17 :</b> Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers l'Ouest.....	121
<b>Figure IV-18:</b> Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers le Sud.....	121
<b>Figure IV-19:</b> Répartition des puissances reçues du soleil suivant les orientations des façade sen été.....	122
<b>Figure IV-20 :</b> projection sténographiquement sur un plan horizontal de la course du soleil pour la ville de Tizi Ouzou.....	123
<b>Figure IV-21:</b> projection sur un plan vertical de la course du soleil Pour la ville de Tizi Ouzou.....	124
<b>Figure IV- 22:</b> Influence du relief sur la température.....	126
<b>Figure IV-23 :</b> Influence de l'eau sur la température.....	127
<b>Figure IV-24 :</b> Influence de la végétation sur la température.....	127
<b>Figure IV-25:</b> Influence du site urbain sur la température.....	128
<b>Figure IV-26 :</b> la couche limite atmosphérique.....	130
<b>Figure IV-27</b> la vitesse du vent.....	132
<b>Figure IV-28 :</b> l'influence des étendues d'eau sur la vitesse du vent.....	132
<b>Figure IV-29 :</b> l'influence du relief sur la vitesse du vent.....	133
<b>Figure IV-30:</b> l'influence de la végétation sur la vitesse du vent.....	133
<b>Figure IV-31 :</b> l'influence de la ventilation nocturne sur la température intérieure.....	135
<b>Figure IV-32:</b> L'évolution de l'humidité relative en fonction de la température.....	136
<b>Figure IV-33 :</b> évolution de température dans un bâtiment .....	141
<b>Figure IV-34:</b> Sonde géothermique verticale.....	144
<b>Figure IV-35:</b> Ground cooling ventilation in Covoli villas.....	146
<b>Figure IV-36:</b> tour à vent avec souterrain pour un refroidissement Evaporatif.....	146
<b>Figure IV-37:</b> Principe de fonctionnement d'un puits canadien.....	159
<b>Figure IV-38 :</b> Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau.....	154
<b>Figure IV-39 :</b> Effet de l'humidité du sol sur la diffusivité thermique.....	160
<b>Figure IV-40:</b> Effet de la surface du sol sur les variations annuelles de la température .....	161
<b>Figure IV-41 :</b> Superposition des trois termes du modèle thermique de sol.....	167
<b>Figure IV-42:</b> Représentation de la variation annuelle de la température dans le Sol .....	172
<b>Figure IV-43 :</b> Représentation du comportement d'un signal de température sinusoïdal dans le sol (amortissement et déphasage) en fonction de la profondeur.....	172
<b>Figure IV-44:</b> Schéma de la géométrie du puits canadien (Fonctionnement en rafraîchissement).....	173
<b>Figure IV-45 :</b> Schéma du modèle proposé (Vue de dessus).....	174

<b>Figure IV-46</b> : Le modèle proposé (Vue en coupe verticale).....	175
<b>Figure IV-47</b> : schéma de la maille de sol1, tube et air ave résistances thermique équivalentes ( coupe de face et de profile).....	177
<b>Figure IV-48</b> : Détail de la maille de sol globale pour un puits à trois tubes (sol2).....	177
<b>Figure IV-49</b> : Schéma de principe du système de ventilation intégré.....	182
<b>Figure IV-50</b> : Détail de puits canadien.....	184
<b>Chapitre V</b> .....	
<b>Figure V-6</b> : Délimitation de la zone d'étude.....	195
<b>Figure V-7</b> : évolution de la température de l'air.....	196
<b>Figure V-8</b> : la vitesse du vent.....	197
<b>Figure V-9</b> : Humidité relative.....	197
<b>Figure V-10</b> : la distribution des précipitations.....	198
<b>Figure V-11</b> : le rayonnement global.....	198
<b>Figure V-12</b> : diagramme psychrométrique pour la ville de Tizi Ouzou.....	200
<b>Figure V-13</b> : Situation de la maison.....	202
<b>Figure V-14</b> : configuration géométrique du cas d'étude.....	203
<b>Figure V-15</b> : façade principale.....	203
<b>Figure V-16</b> : Prototype de mesure de la température sèche à l'intérieur et à l'extérieur de la maison.....	206
<b>Figure V-17</b> : l'évolution journalière dans la température sèche de l'air a l'intérieure de la maison.....	207
<b>Figure V-18</b> : Prototype de mesure de la température humide à l'intérieur et à l'extérieur de la maison.....	207
<b>Figure V-19</b> : l'évolution journalière dans la température humide de l'air a l'intérieure de la maison.....	208
<b>Figure V-20</b> : Les caractéristiques thermiques de l'ambiance de la maison.....	208
<b>Figure V-21</b> : conductivité thermique du sol.....	211
<b>Figure V-22</b> : Evolution annuelle de la température de sol pour la région de Tizi Ouzou en fonction de la profondeur et de la teneur en eau.....	212
<b>Figure V-23</b> : L'évolution de la température de sortie pour une configuration à un seul tuyau pour une longueur de 40 m.....	215
<b>Figure V-25</b> : répartition de en 03 tubes.....	215
<b>Figure V-26</b> : L'évolution de la température de sortie pour une configuration en trois tuyaux pour une longueur de 40m.....	216

## Liste des Tableaux

<b>Chapitre I</b> .....	
<b>Tableau I-01</b> : Taux d'équipement en climatisation dans le monde.....	8
<b>Tableau I-02</b> : Variation saisonnière de températures T, des précipitations P, de l'ETP (E) et de l'indice Hydrique (h=E-P) entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990.....	12
<b>Tableau I-03</b> : calcul de la charge électrique due à la climatisation selon la reflectance de la toiture.....	19
<b>Chapitre II</b> .....	
<b>Tableau II-01</b> : plan d'action relatif au secteur du bâtiment résidentiel.....	65
<b>Chapitre IV</b> .....	
<b>Tableau IV-01</b> : Classes et hauteur de rugosité.....	131
<b>Tableau IV-02</b> : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol.....	158
<b>Tableau IV-03</b> : Valeur de l'albedo pour différentes surfaces.....	160
<b>Chapitre V</b> .....	
<b>Tableau V-1</b> : données climatique pour la ville de Tizi ouzou.....	199
<b>Tableau V-2</b> : composition de l'enveloppe.....	204
<b>Tableau V-3</b> : les équipements électroménagers.....	204
<b>Tableau V-4</b> : Les caractéristiques thermique du sol .....	213
<b>Tableau V-05</b> : Les caractéristiques thermique du tube.....	213
<b>Tableau V-06</b> : Le calcul de la longueur de tube.....	214

## Introduction générale

En cette fin du millénaire, surtout ce dernier siècle qui est qualifié de technologique, l'heure est propice aux bilans. Des nouveaux concepts surgissent couramment dans la littérature, notamment :

- Le développement économique et sa disparité mondiale,
- Les ressources énergétiques et leurs pérennités,
- L'environnement et son devenir.

En effet, le développement économique entraîne des exigences grandissantes de la société dans sa course vers l'amélioration de son bien être, associées à une utilisation intensive des énergies très souvent mal gérées.

L'analyse des secteurs responsables de la plus grande partie de la consommation d'énergie met en évidence le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) qui représente à lui seul 40 % de la consommation d'énergie finale mondiale et responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre [IEA, 2008]. Une part croissante est réservée au poste de climatisation qui consomme 15 % de l'électricité produite dans le monde [Santamouris, 2006] et contribue à l'effet de serre 1300 fois plus que le CO<sub>2</sub> [Salamon et Aubert, 2004]. Ces valeurs correspondent aux exigences accrues en matière du confort thermique [Chatzidimoula, 2004; Avgelis et al, 2005] qui est devenu de masse et constitue une demande reconnue dans le bâtiment, vu son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant [Roulet, 2004] et reflètent les conséquences de la mauvaise conception du bâtiment qui s'est faite dans l'ignorance des aspects climatiques [Lavigne et al, 1994] encore plus, l'évolution de l'architecture qui a favorisé la construction de bâtiments à faible inertie, plus ouverts sur l'extérieur, augmentant considérablement le rapport entre les ambiances intérieures et le climat extérieur dont les problèmes de surchauffe estivale se sont posés avec acuité et que les usagers ne tolèrent pas [Givoni, 1978].

Ce modèle d'architecture confie, à la seule technique le soin de créer un microclimat artificiel par les installations de climatisation qui entraînent de forte consommation d'énergie électrique, d'origine fossile, épuisable et polluante. Outre la consommation d'énergie, elles se caractérisent par un coût d'investissement et d'exploitation très élevés, le recours aux fluides frigorigènes contenant des CFC contribuant directement à la destruction de la couche d'ozone et l'effet de serre ainsi que la mauvaise qualité de l'air qui se traduit par la présence excessive des particules polluantes préjudiciable à la santé des occupants [Salamon et Aubert, 2004].

Le recours à ces installations s'est accentué, après la canicule de 2003 et les nouvelles canicules annoncées par les météorologues, qui devaient perdurer avec la croissance prévue de l'urbanisation et de possibilité de réchauffement de la planète. Cette situation a marqué tous les pays méditerranéens [Santamouris et Asimakopoulos, 1996], notamment l'Algérie où le climat et l'augmentation de niveau de vie génèrent une véritable "culture de la climatisation" [Hetzl et al, 2007].

Avec l'évolution du contexte énergétique mondial, caractérisé par l'appauvrissement des réserves d'énergie fossile, le réchauffement de la planète en partie dû à l'émission de gaz à effet de serre, la dégradation de notre écosystème et avec l'intérêt grandissant pour le développement durable, il est impératif et urgent de développer dans le bâtiment des techniques alternatives aux machines frigorifiques à faible impact environnemental, faisant appel aux énergies renouvelables, visant ainsi les économies d'énergie avec une garantie de conditions de vie satisfaisantes aux usagers [Santamouris, 2009]. Certes, pour atteindre ces objectifs, il est indispensable d'allier des éléments qui se réfèrent aux principes de l'architecture bioclimatique qui reposent essentiellement sur les anciens principes de la construction délaissés au nom de la technologie [Kzeoui et al, 2002] et ce, à travers [IEPF, 2000] :

- Actions sur l'enveloppe du bâtiment (protections solaires, inertie, isolation,..) et meilleur contrôle des gains internes (éclairage,..),
- Utilisation de systèmes de rafraîchissement passifs.

Dans ce contexte, des études et réalisations ont démontré l'efficacité de plusieurs technologies alternatives à la climatisation conventionnelle, susceptibles de réaliser des économies en énergie primaire et la réduction des émissions de gaz à effet de serre [Santamouris, 2009]. Les techniques de rafraîchissement combinées aux énergies renouvelables, notamment le solaire passif constitue une des solutions les plus répandues dans le secteur du bâtiment qui ont prouvé leur efficacité à la réduction de la consommation mondiale en énergie due à la climatisation, soit de 2.3 MTep le secteur autre que le résidentiel et 5.2MTep pour le secteur résidentiel respectivement. Les perspectives pour 2010, prévoient de réduire la consommation de 5 MTep et 12 MTep respectivement, qui contribueront à une réduction conséquente de la pollution atmosphérique en 2010 estimée à 3 millions tonnes de Co<sub>2</sub> pour le secteur résidentiel et 0.01 million de tonnes de SO<sub>2</sub> [Santamouris et Asimakopoulos, 1996].

Outre l'énergie solaire, des expériences ont pour démontré que l'énergie puisée de sous sol (la géothermie), peut être utilisée comme une source de fraîcheur dans le bâtiment [Givoni,

2007], dont l'Algérie se dispose d'un potentiel important en énergie géothermique sous ses diverses formes, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement [CDER, 2006]. Pour permettre son application dans le bâtiment notamment pour répondre aux besoins de rafraîchissement, nous nous intéresserons à l'énergie contenue dans le sol adjacent (géothermie de surface), souvent inutilisée et qui correspond à une production de chaleur à faible niveau de température [Virgone et al, 2006], pour laquelle il existe des techniques ancestrales qui consistent à utiliser l'inertie thermique du sol pour pré traiter l'air neuf de renouvellement des bâtiments à l'aide d'un échangeur air/sol, qui fera l'objet de cette étude.

Cette étude vise à contribuer à faire progresser les connaissances relatives à la démarche qui permet l'intégration de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment et l'étude du potentiel de rafraichissement via cette combinaison : bâtiment - système geocooling (puits provençal), développée dans un model analytique et numérique, implémentée dans un environnement modulaire adaptés à une maison individuelle située dans un lotissement résidentiel au Sud Ouest de la ville de Tizi-Ouzou.

## **I-1- Introduction**

La climatisation est aujourd'hui au centre de vastes débats souvent très animés par les scientifiques, les pouvoirs publics et les concepteurs. Elle constitue une mesure imposée comme une évidence pour se prémunir contre les effets des canicules récurrentes liées au probable dérèglement climatique. Son utilisation est à l'origine de nombreux problèmes écologiques et sanitaires : consommation effrénée d'énergie électrique, gaz à effet de serre rejeté dans l'atmosphère (CO<sub>2</sub> induit par la consommation énergétique), risques de diffusions virales et d'allergies.

Au regard des préoccupations énergétiques et environnementales, ce chapitre vise à définir le cadre précis de notre travail.

## **I-2- Contexte général de la recherche**

### **I-2-1- Le contexte énergétique global**

La consommation mondiale d'énergie est restée très longtemps stable lorsque l'homme n'utilisait l'énergie que pour sa survie et ses besoins alimentaires [Salomon et Bedel, 1999]. A partir de 1850, la révolution industrielle a provoqué une augmentation brutale des besoins en énergie [Salomon et Bedel, 1999]. Les populations utilisent l'énergie en appliquant des technologies pour faire face à leurs besoins de confort, d'éclairage, de mobilité, de produits transformés,...ect. Ce rapport entre utilisations d'énergie et les besoins essentiels de l'homme font de l'énergie une source fondamentale pour presque tous les aspects liés à l'activité humaine [OCDE, 1999].

En 2004, la consommation mondiale d'énergie finale<sup>1</sup> était de 7 893 Mtep<sup>2</sup> et la consommation d'énergie primaire<sup>3</sup> de 10 485 Mtep, pour une population mondiale de 6,34 milliards d'habitants [IEA, 2008]. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie va augmenter de 50 % entre 2004 et 2030 [IEA, 2008], pour accompagner la croissance démographique et économique. En trente ans et depuis le premier choc pétrolier, la consommation d'énergie a donc augmenté de 20% même si elle a connu une baisse dans les années 1980-1985 après le second choc pétrolier [David et Fabre, 2004].

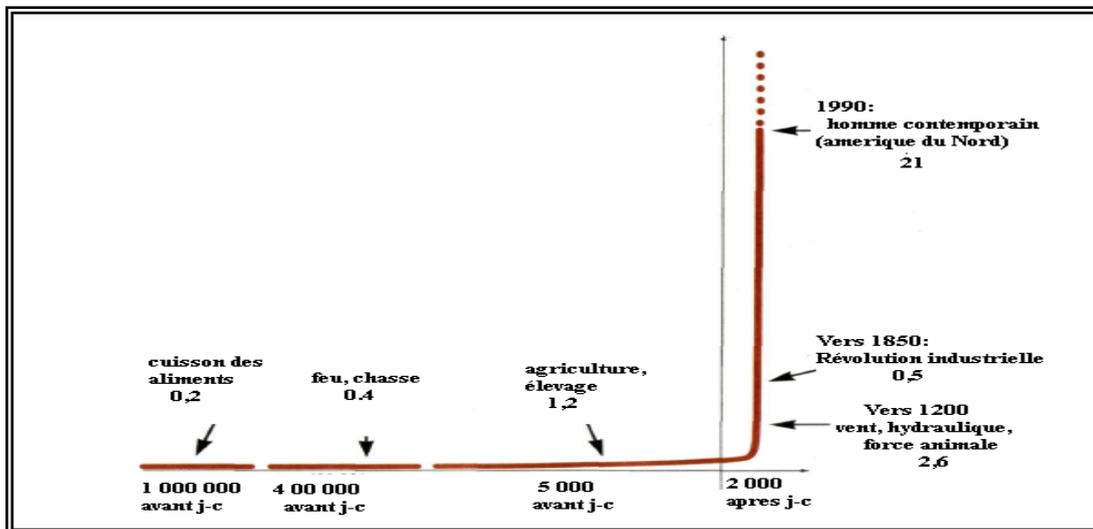
<sup>1</sup> L'énergie primaire désigne l'énergie non transformée après extraction, il peut s'agir de la houille, de la lignite, de pétrole brut, de gaz naturel ou d'électricité primaire [OCDE, 1999]

<sup>2</sup> Mtep : million de tonnes équivalent pétrole, une tep est l'énergie contenue dans une tonne du pétrole, soit 1165 litre de fioul [Alain Liebard, André de Herde, 2005].

<sup>3</sup> L'énergie finale désigne : le fuel, le gaz, électricité de chauffage ou essence à la pompe [OCDE, 1999]

Le taux de consommation diffère d'un pays à un autre, il est déterminé par les conditions climatiques, le taux de croissance économique, le développement technologique, le prix actuel de l'énergie, les conditions de vie, le mode de vie et la croissance démographique [Santamouris et al, 2001].

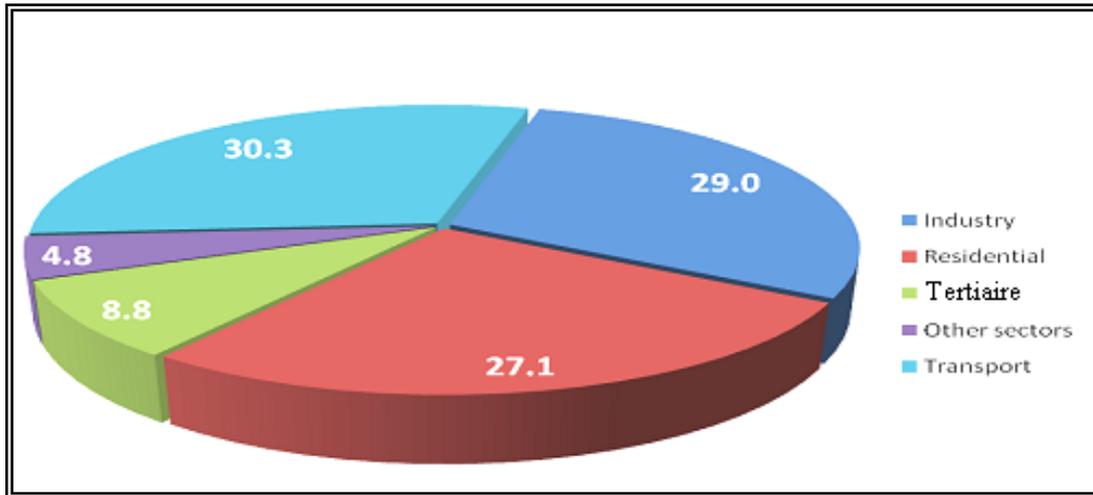
Actuellement la demande mondiale d'énergie croît de 2% par an en moyenne [Liebard et de Herde, 2005]. La consommation d'électricité devrait augmenter deux fois plus vite que la consommation moyenne d'énergie [Sarlos et al, 2003]. Or, les énergies fossiles couvrent aujourd'hui 65 % de la production d'électricité (41% pour le pétrole, 21% pour le gaz naturel, 21% pour le charbon) [Wiesenfeld, 2005]. Cette situation n'est pas tenable, car les réserves d'énergie fossile sont tarissables, de plus, elles sont la cause principale des émissions de gaz à effet de serre. La production de pétrole devrait décliner à partir de 2030 et celle de gaz à partir de 2050. Un appel massif au charbon pourrait en repousser l'échéance. Mais le charbon, lui-même ressource épuisable, n'est pas substituable aux hydrocarbures pour tous les usages [Sarlos et al, 2003].



**Figure I-01** : L'évolution de la consommation d'énergie  
(Source : Salomon et Bedel, 1999)

Le secteur du bâtiment pèse lourd dans la consommation d'énergie. La consommation mondiale en énergie primaire équivalente à 19 millions barils de pétrole par jour qui représente presque la totalité de la production journalière de l'OPEC [Santamouris et al, 2001]. Conformément aux statistiques de l'agence internationale d'énergie, la consommation d'énergie finale dans le bâtiment pour l'année 2004-2005, avoisine 1951 Mtep pour le secteur résidentiel, et 638 Mtep pour le secteur tertiaire [IEA, 2008]. Cette consommation représente 40% de

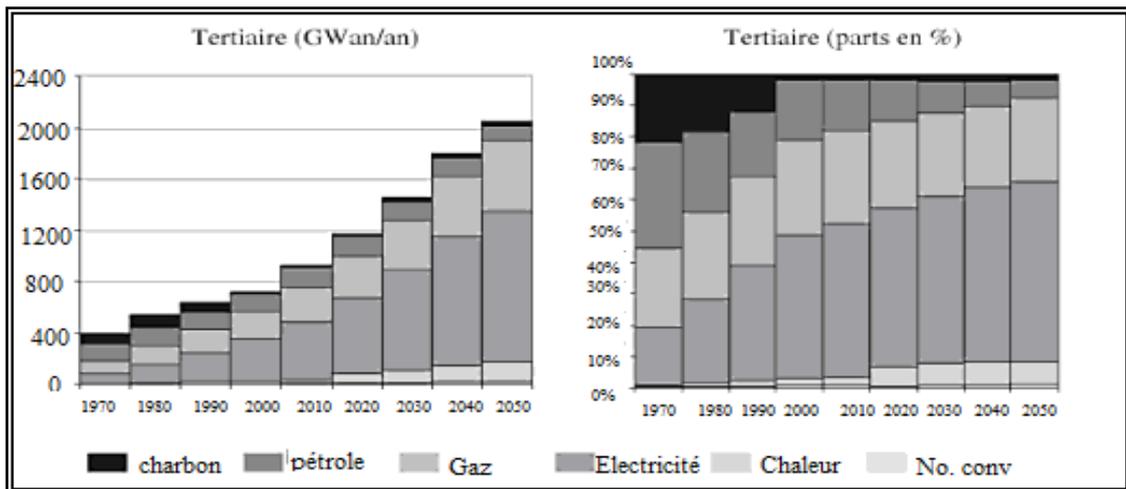
l'énergie finale mondiale [IEA, 2008] dont la part la plus importante est réservée pour le secteur résidentiel qui consomme 27% de l'énergie finale après l'industrie et le transport [IEA, 2008].



**Figure I-02 :** consommation énergétique dans différents secteurs économiques (Source : IEA ,2008)

### I-2-1-1- Perspective de consommation pour le Secteur tertiaire

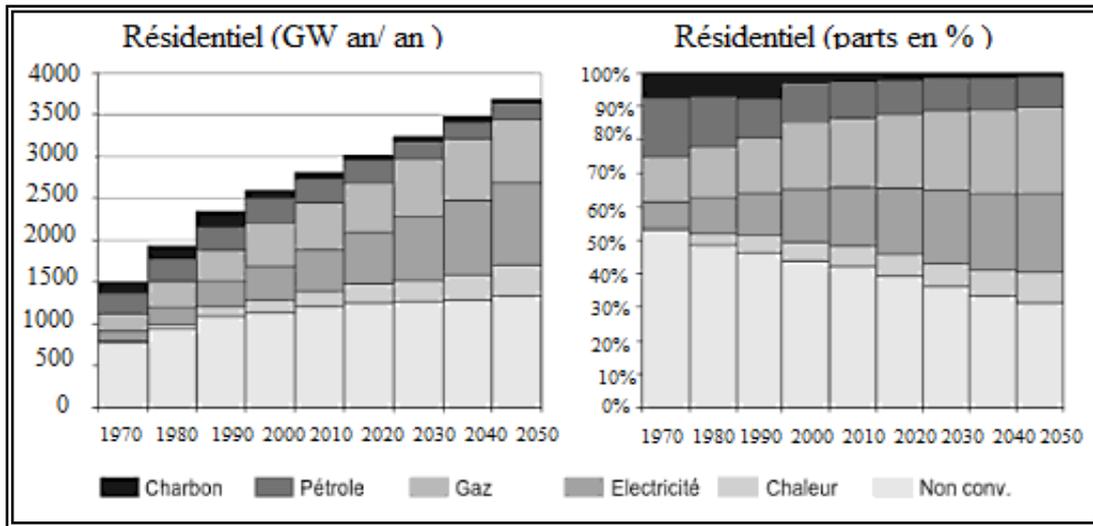
On pourrait obtenir en 2050 une consommation moyenne par habitant à l'échelle mondiale de 0.210 kWan/an.hab contre 0.120 kWan/an.hab en 2000, soit une progression moyenne de 1.2% [ Sarlos et al, 2003].



**Figure I-03 :** Consommation mondiale d'énergie finale dans le secteur tertiaire (Source : Sarlos et al, 2003)

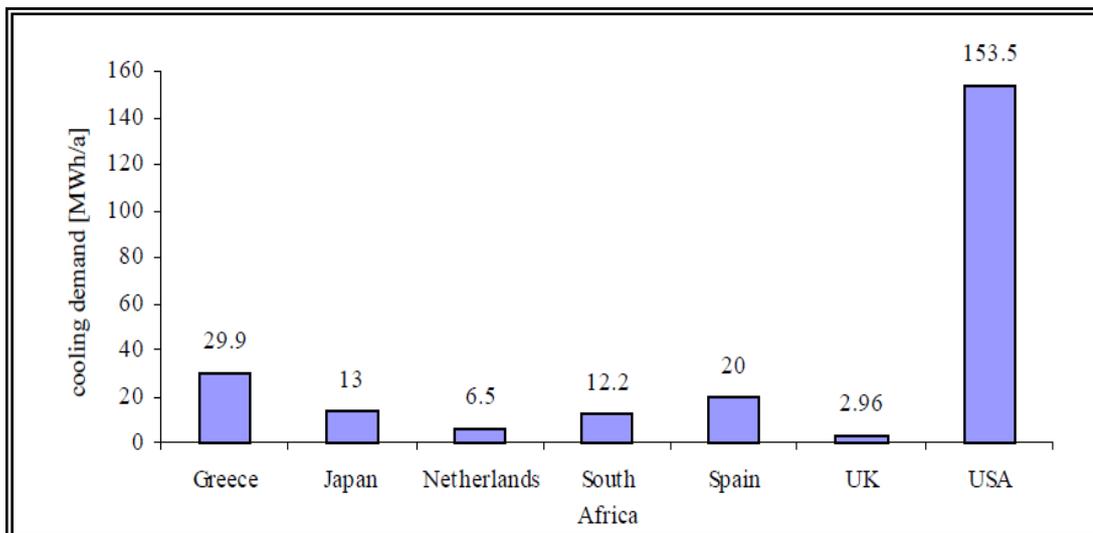
### I-2-1-2- Perspective de consommation pour le Secteur résidentiel

L'évolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment est basée sur la tendance de la consommation du secteur par habitant. Ainsi, la consommation mondiale du secteur pourrait se situer autour de 4200 GWan/an en 2050 contre 1951 GWan/an en 2000 [Sarlos et al, 2003].



**Figure I-04 :** Consommation mondiale d'énergie finale dans le secteur Résidentiel  
(Source : Sarlos et al, 2003)

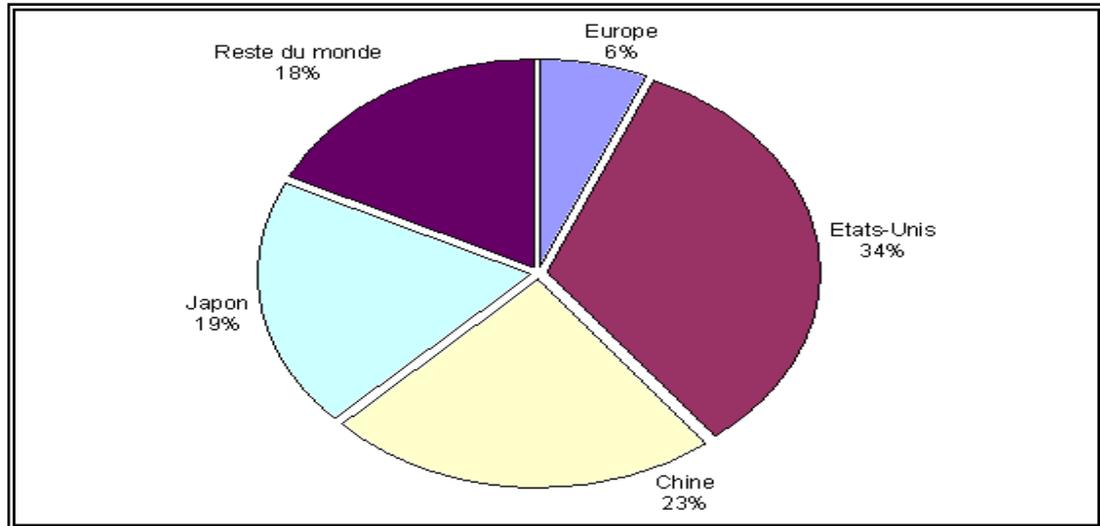
La consommation d'énergie pour la climatisation marque aussi une évolution progressive. Elle consomme 15% de l'énergie électrique produite dans le monde. En Europe la demande énergétique pour la climatisation dans les bâtiments tertiaires a évolué de 1400 GWh/an à 11 000 GWh/an et tend à s'accroître à 28 000 GWh/an pour l'année 2010. Elle est de 20 kWh/m<sup>2</sup> pour la Suède, de 40-50 kWh/m<sup>2</sup> pour la Chine et de 61 kWh/m<sup>2</sup> pour le Canada. Dans le Sud de l'Europe [Eicker, 2001], les installations de climatisation ont dominé le secteur résidentiel, 71% des climatiseurs sont installés dans le secteur résidentiel [Granados, 1997]. Les charges journalières de la climatisation 200 Wh/m<sup>2</sup> [Zimmermann, 1999].



**Figure I-05:** consommation énergétique pour la climatisation dans le bâtiment  
(Source : Eicker, 2001)

Cette consommation est accompagnée d'une ascension brutale des ventes de climatiseurs. Le marché mondial de la climatisation est en expansion. Il a été estimé à 39,7 millions d'appareils

vendus en 2000 [RPF, 2001]. Ce résultat se répartit entre 29.9 millions d'unités RAC (Room Air Conditioners, c'est à dire climatiseurs individuels) et 9,8 millions d'unités CAC (Central Air Conditioners, c'est à dire climatisation centralisée). Le marché Américain reste le premier avec 13,2 millions d'unités vendues en 2000 avec une croissance de 3.1%. Le marché Chinois explose avec 9.2 millions d'unités vendues. Le marché Japonais a connu une croissance de 9% entre 1999 et 2000, passant ainsi à 7,7 millions d'unités vendues en 2000. En 2000, le marché mondial de la climatisation était estimé à 35 milliards de US\$ [MAD, 1999].



**Figure I-06:**Le marché de climatisation dans le monde  
(Source : RPF, juin 2001)

Les climatiseurs sont plus répandus dans le secteur tertiaire. Le taux d'équipement en Europe est très en deçà des valeurs des autres pays de l'OCDE (100 % au Japon et 80 % aux Etats-Unis).

<b>PAYS</b>	<b>TERTIAIRE</b>	<b>RESIDENTIEL</b>
<b>Japon</b>	<b>100%</b>	<b>85%</b>
<b>Etats-Unis</b>	<b>80%</b>	<b>65%</b>
<b>Europe</b>	<b>27%</b>	<b>5%</b>

**Tableau I-01 :** Taux d'équipement en climatisation dans le monde  
(Source : Adnot, 1999)

### I-2-1- 3- Contribution du bâtiment à la consommation d'énergie en Algérie

Le bilan énergétique national de l'année 2005, montre que la consommation finale de secteur du bâtiment est évaluée à 7047 ktep [APRUE, 20007] qui fait ressortir une prédominance de ce secteur, soit 40.6% de la consommation finale par rapport aux secteurs de l'industrie et celui des transports [CDER, 2006]. Cette consommation a triplé durant les trois dernières décennies et il est prévu sa multiplication par le même facteur d'ici l'an 2025 [MHU, 2009].

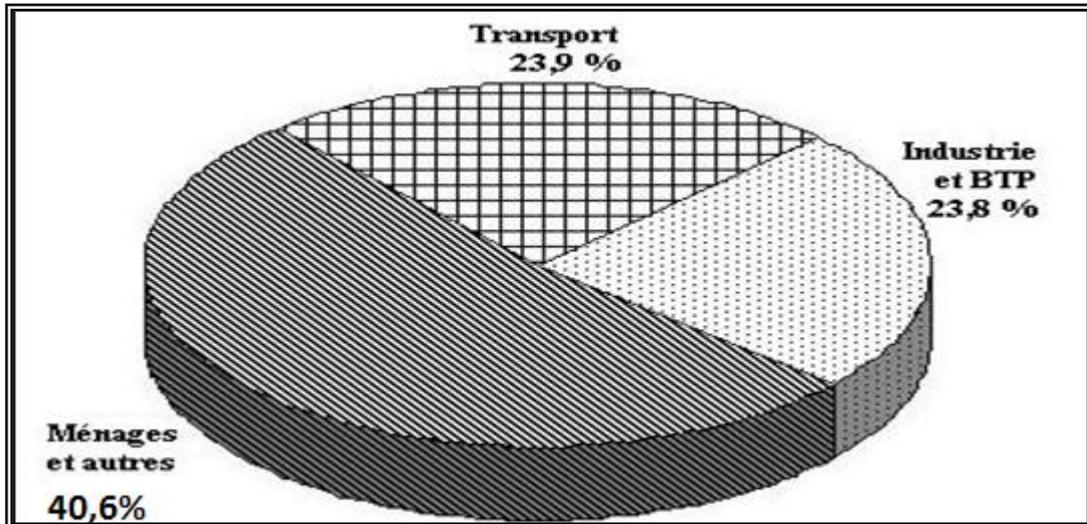


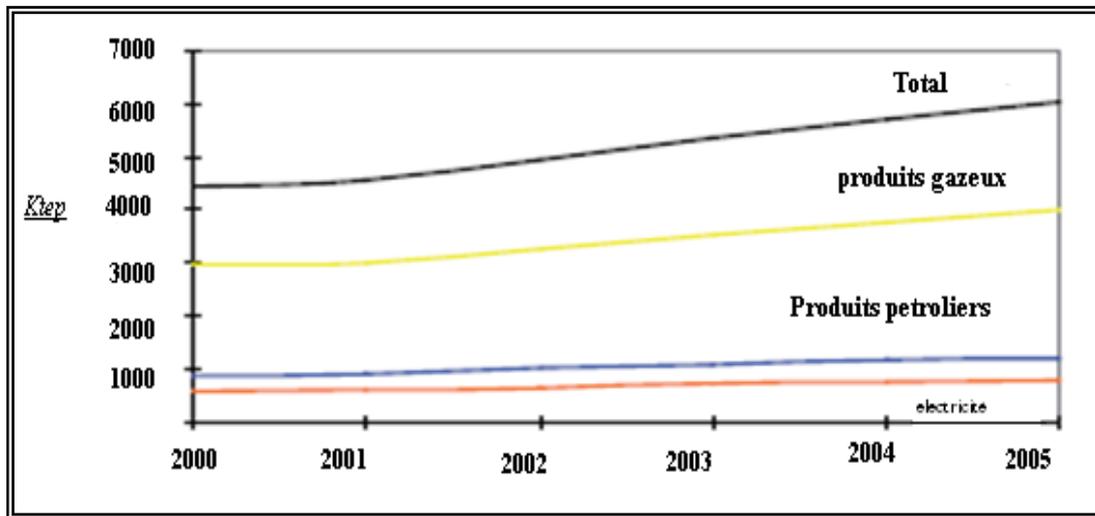
Figure I-07 : Consommation finale par secteur (évaluée en 2005 à 24,437 millions TEP)  
(Source : CDER, 2006)

### Chiffre clefs pour le secteur du bâtiment en Algérie

#### - Secteur résidentiel

- Le parc logement est estimé à 6 748 057 ` (RGPH 2008) contre 5 745 645 en 2005 dont 4 742 457 soit 70% en secteur urbain, structuré comme suit : 1 007 000 immeubles d'habitation et 3 091 000 maisons individuelles, 761000 maisons traditionnelles [ONS, 2009].
- Le taux d'occupation est de 6 .5 personnes par logement (RGPH 2008)[ONS,2009]
- Le taux d'équipement des ménages est de 70% [APRUE, 2007]
- Le taux d'électrification est de 98% [APRUE, 2007].
- Le taux de raccordement au réseau gaz naturel est de 36%. [APRUE, 2007]
- La consommation énergétique moyenne annuelle d'un logement est de 1.050 tep [CDER, 2006], justifiée par la multiplication des postes consommateurs d'énergie dans ce secteur, à savoir [Chitour, 1991] :

- Le chauffage qui représente la plus forte consommation environ 60% de l'énergie domestique;
- L'éclairage et l'électroménager, l'audio visuel et la climatisation représentent près de 20%;
- L'eau chaude sanitaire nécessaire représente près de 15% ;
- La cuisson représente près de 5%.



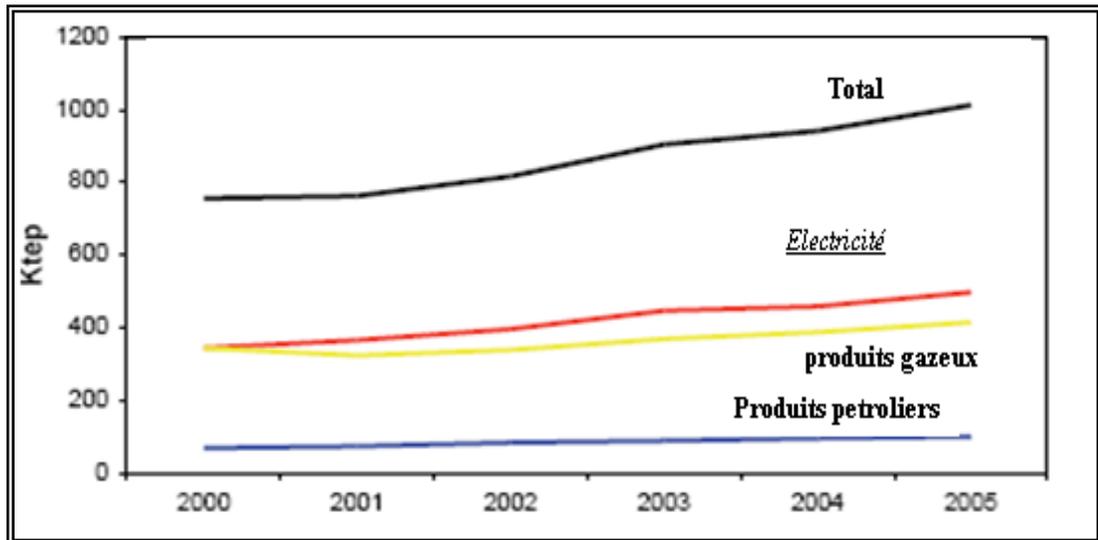
**Figure I-08** : Evolution de la Consommation énergétique du Secteur Résidentiel  
(Source : APRUE, 2007)

En étudiant ces graphes, la consommation importante du gaz et de l'électricité dans l'habitat revient essentiellement à l'utilisation intense du chauffage en hiver et de la climatisation en été. Cuisson, éclairage, électroménager et eau chaude sanitaire représentent chacun un taux moins élevé comparé à celui du chauffage ou de climatisation. Plusieurs facteurs interviennent directement dans la détermination de cette énergie. D'une part les facteurs socio-économiques en rapport avec le niveau de vie des Algériens. D'autre part, les facteurs de la caractéristique de l'habitat et l'aménagement urbain (caractéristiques thermiques de la construction, densité du groupement..).

### - Secteur tertiaire

La consommation énergétique se répartit comme suit : commerce : 39%, administration centrale : 19%, tourisme : 8%, santé : 12%, éducation : 8% éclairage public : 5%, autres : 5%. Entre 2000 et 2005 la consommation finale du secteur a progressé annuellement de 6%. Ce sont l'électricité et les produits gazeux qui ont contribué à cette évolution avec des parts respectives de 50% et 40%. Une forte demande d'électricité est à prévoir en raison des perspectives de développement de ce secteur. En ce qui concerne l'analyse par usage de l'électricité, il est à

noter que l'éclairage et la climatisation totalisent 90%. Le chauffage et la cuisson représentent 60% de la consommation du gaz naturel [APRUE, 2007].



**Figure I-09** : Evolution de la Consommation énergétique du Secteur tertiaire  
(Source : APRUE, 2007)

L'énergie consommée par le secteur résidentiel et tertiaire est responsable de l'émission de 6312 kteq CO<sub>2</sub> de gaz à effet de serre [APRUE, 2007] après avoir été de 12 milliers de teq CO<sub>2</sub> en 1998 (17.23% des missions nationales) [MEAT, 1998]<sup>4</sup>. Depuis la crise pétrolière de 1973, et à l'instar des autres pays dans le monde, l'Algérie a pris conscience du caractère vital de cette matière et sur la nécessité de lutter contre le gaspillage et de développer d'autres ressources afin de répondre aux besoins toujours croissants. Depuis, on assiste à un regain d'intérêt sans précédent pour les énergies renouvelables qui se traduit par d'importants efforts de recherches et de développements [Torrenti et Gilles, 1988].

### **I-2-2- Contexte climatique et la climatisation dans le bâtiment**

Notre étude s'inscrit dans le contexte très présent des changements actuels du climat planétaire. Le réchauffement de la planète indique des augmentations de températures causées par une présence plus grande de gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui empêche l'évacuation de la chaleur de la terre vers l'espace [Enright, 2001]. Cette perturbation climatique entraîne une redistribution mensuelle de la consommation énergétique des mois d'hiver vers les mois d'été ainsi qu'une modification de pointe de chaque mois [Guimont 2002].

<sup>4</sup> Rapport ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire, 1998 : Projet national ALG/98/G31Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques

L'Algérie est vulnérable à ce phénomène. L'ensemble des études réalisées par BOUCHERF Djamel affirme que [Boucherf, 2006]<sup>5</sup>:

- les précipitations en Algérie ont tendance à la baisse depuis l'année 1975 et la phase ascendante des pluies n'est pas encore prête d'être amorcée ;
- la pluviométrie a baissé en moyenne de 10% ;
- les températures ont tendance à augmenter depuis plus de deux décennies sur la partie nord de l'Algérie ;
- le réchauffement a été de l'ordre de 0.5°C; l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle indiquée dans le tableau ci-dessous est une conséquence de l'augmentation de la température (l'évapotranspiration est une fonction croissante de la température).

Le pays connaît une hausse des températures et subit des sécheresses sévères et des inondations (Bab El Oued en 2001, Ghardaïa en 2008), des incendies de forêts, la dégradation de la steppe sur les hauts plateaux, et malheureusement une aggravation de la désertification [Boucherf, 2006].

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
<b>Oran</b>	T : +0,7 °C P : -1,6 mm E : +36mm H : +52mm	+0,9°C -43mm +11mm +54mm	0°C +25mm +12mm -13mm	+0,2°C +12mm +51mm +39mm	+0,45°C -22mm +110mm +132mm
<b>Alger</b>	T : +0,3 °C P : +2 mm E : +8mm H : +6mm	+0,8°C -32mm -2mm +30mm	-0,3°C +16mm -19mm -35mm	-0,2°C +9mm +37mm +28mm	+0,15°C -5mm +24mm +29mm
<b>Anaba</b>	T : +0,2 °C P : -52 mm E : -20mm H : +32mm	+0,8°C -35mm -22mm +13mm	+0,3°C -20mm -25mm -5mm	+0,2 °c +2mm +33mm +31mm	+0,4°C -105mm -34mm +171mm
<b>In Salah</b>	T : +0,3°C P : +3 mm	+1,1°C +2mm	+0,4°C 0mm	+0,5°C 0mm	+0,6°C +1mm
<b>Tamanrasset</b>	T : +0,4 °C P : -2 mm	+1,6°C +2mm	+0,3°C -5mm	0°C -2mm	+0,6°C -2mm

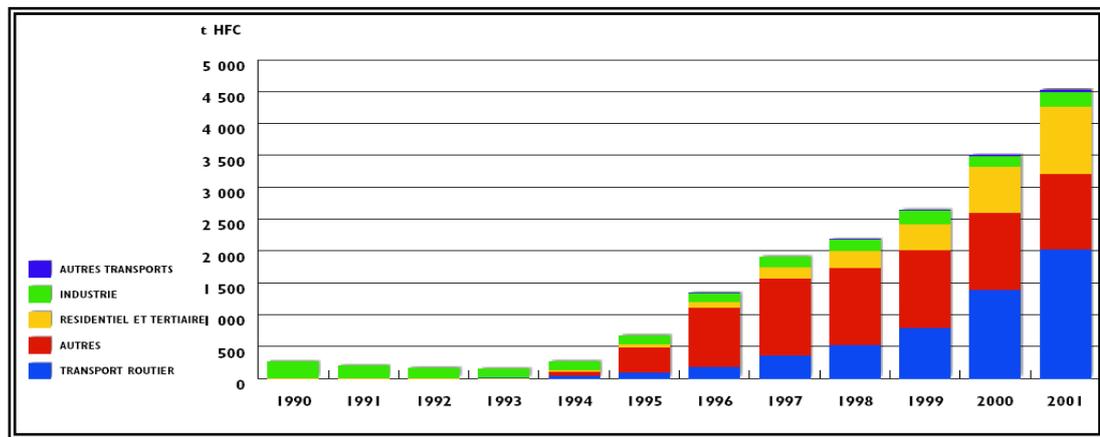
**Tableau I-02 :** Variation saisonnière de température T, des précipitations P, de l'ETP (E) et de l'indice Hydrique (h=E-P) entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990.

(Source : Boucherf, 2006)

<sup>5</sup> Boucherf Djamel : Variabilité et Changement climatique au Sahara , séminaire Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in arid and hot regions?? Ghardaïa, Algeria, 9-12 December 2006, p23.

L'effet du réchauffement pourrait induire une augmentation de la consommation d'électricité pour la climatisation de l'ordre de 141%, car une augmentation de 1°C de température de l'air en valeur moyenne journalière entrainera une augmentation environ 8MWde puissance électrique appelée à répondre au besoin de climatisation [Hadorn, 2005]. Ainsi, une réduction de la consommation d'électricité pour le chauffage de 20% d'ici 2015 [Bergeron 1997].

De ce fait, la généralisation de la climatisation n'est pas sans conséquences environnementales. Les systèmes de climatisation contribuent significativement aux changements climatiques<sup>6</sup> par leurs émissions de gaz frigorigènes (CFC, HCFC) dans l'atmosphère qui détruit l'ozone stratosphérique et par les émissions de gaz à effet de serre<sup>7</sup> associées à l'utilisation de l'énergie nécessaire à l'opération des refroidisseurs [Garimella 2003].



**Figure I-10** : Evolution des émissions de HFC  
(Source : Matarass, 2005)

Toutefois, les refroidisseurs ont connu des progrès technologiques remarquables au cours des dernières années et les systèmes de climatisation modernes ont une haute performance énergétique. Le potentiel de réchauffement du climat associé aux refroidisseurs récents a diminué de 48% par rapport à celui d'il y a 20 ans et ce, notamment en raison des nouveaux réfrigérants moins polluants, d'un meilleur contrôle des fuites et une grande amélioration de la performance mécanique des compresseurs [Calm, 2002].

<sup>6</sup> Les changements climatiques : Un changement climatique correspond à une modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des forces extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines [4ème rapport du GIEC, 2007].

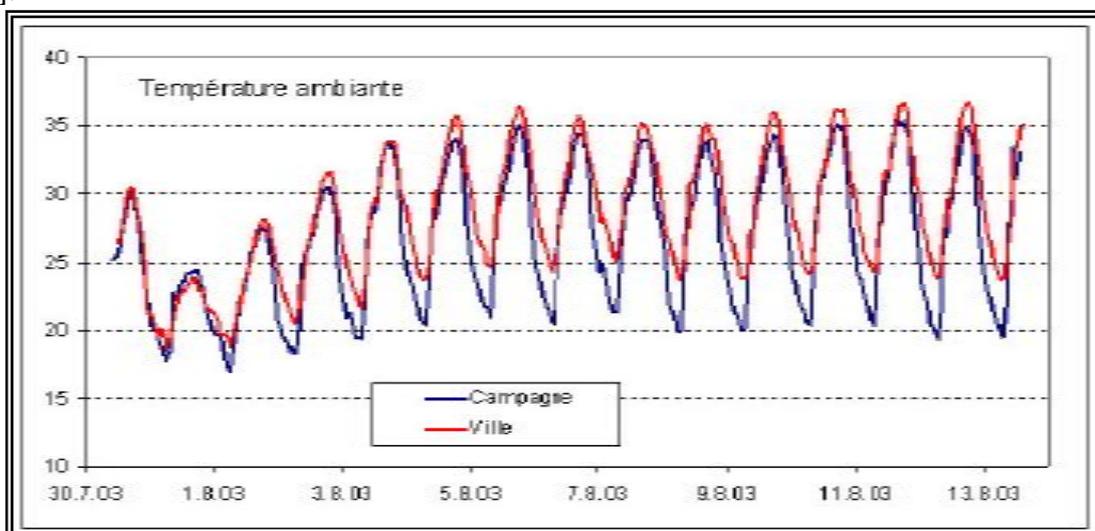
<sup>7</sup> L'effet de serre est un phénomène naturel, indispensable à la vie sur terre et qui assure une température moyenne de +15°C environ au lieu de -18°C. En fait, une température de -18°C ferait geler les océans, ce qui augmenterait considérablement leur albédo (pouvoir réflecteur) faisant chuter les températures autour de -100°C. La terre reçoit la majeure partie de son énergie du soleil (principalement sous forme de lumière visible), une partie est directement réfléchiée, une autre absorbée et une dernière rayonnée sous forme d'infrarouges par notre planète. Le rayonnement infrarouge émis par la terre est en partie intercepté par les gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre tandis que le reste est diffusé vers l'espace. Ainsi, la vapeur d'eau, le méthane, le dioxyde de carbone et le protoxyde d'azote, qui sont les principaux gaz à effet de serre (GES) contribuent à piéger l'énergie renvoyée, augmentant la température moyenne de la terre. En effet, ce sont les gaz à structure poly atomique (au moins 3 atomes) qui retiennent le rayonnement infrarouge au contraire des molécules diatomiques (99% de l'atmosphère) qui ont une structure trop simple. (L.M.D.) du C.N.R.S. et Secrétaire du Programme mondial de recherche sur le climat, 2005].

Paradoxalement, malgré ces progrès technologiques et les campagnes de sensibilisation sur la rationalisation des ressources énergétiques, la consommation énergétique liée à la climatisation est en croissance. Ces augmentations importantes s'expliquent entre autres par une mécanisation croissante des bâtiments en réponse à des nouveaux standards de vie des occupants, mais aussi en raison du réchauffement du climat qui implique une plus grande contrainte de climatisation [Boivin, 2007].

### I-2-3-L'îlot de chaleur urbain et le besoin de climatisation

Il faut admettre aujourd'hui que l'urbanisation conduit à une utilisation incontrôlée de l'énergie électrique. Une analyse récente a affirmé que l'augmentation de la population urbaine est de 1% contribue à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique de 2.2% (2 fois) [Jones, 1992]. Ainsi, l'énergie électrique consommée en milieu urbain pour la climatisation des bureaux et des logements s'est accentuée depuis les deux dernières décennies [Santamouris et Adnot, 2004], dont une augmentation de température d'un (1) Kelvin contribue à l'évolution de la consommation de l'énergie électrique pendant l'été de 3 à 5% [Santamouris et Adnot, 2004].

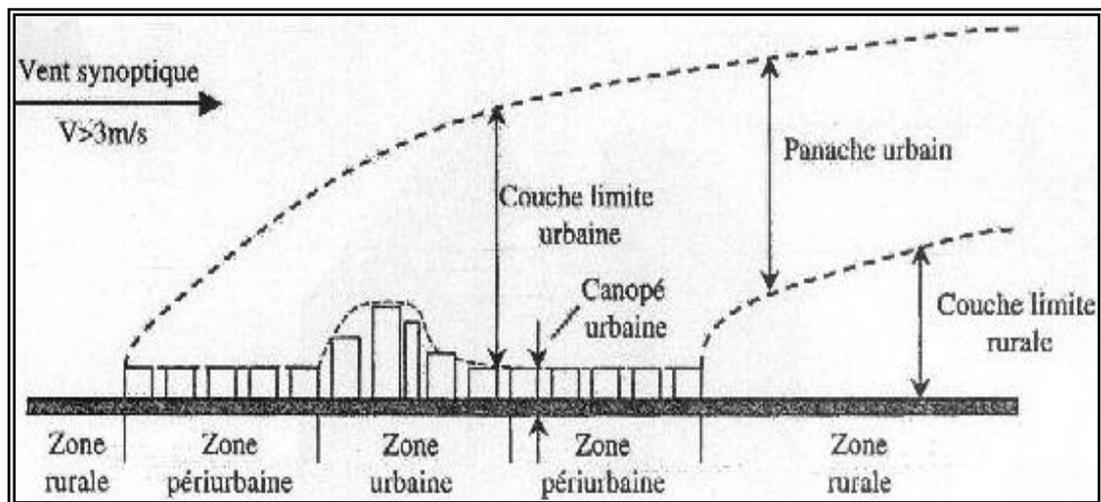
Cette forte consommation liée principalement à la climatisation des bâtiments devient particulièrement importante en environnement urbain car la température de l'air des secteurs urbains denses est plus élevée qu'aux alentours [Glockner, 2000]. Le phénomène est connu sous le nom d'« effet d'îlot thermique » ou bien l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui constitue la manifestation climatique la plus évidente de l'urbanisation. Il peut être défini comme une "oasis à l'envers" un secteur de la ville qui est plus chaud que la campagne environnante [Santamouris, 2004].



**Figure I-11** : Climat urbain et réchauffement climatique  
(Source : Lachal, 2008)

Trois types d'îlots de chaleur urbains sont distingués dans la littérature, soit :

- **les îlots de chaleur à la surface du sol** : grâce à des lectures de rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces, il est possible de déceler les endroits d'une ville où les surfaces sont les plus chaudes [INSPQ, 2009] ;
- **les îlots de chaleur de la canopée urbaine** (Urban Canopy Layer-UCL) correspondent à une couche d'air définie à l'échelle de l'espace urbain ou du bâtiment construit à proximité. Elle est disposée sous la couche limite urbaine et assimilée à une masse d'air se propageant entre les constructions et les aménagements urbains. Elle est souvent de nature très perturbée en raison des mouvements turbulents et des changements climatiques brutaux, dus aux interactions physiques entre les paramètres climatiques et les composantes urbaines. Les variations climatiques qui s'y produisent perturbent l'équilibre thermique et favorisent les processus radiatifs au sol [Glockner, 2000] ;
- **les îlots de chaleur de la couche limite urbaine** (Urban Boundary Layer-UBL) sont un cas particulier de la couche limite atmosphérique (CLA). Ce qui la différencie nettement de la CLA, est l'existence au-dessus des villes d'un îlot de chaleur. Donc, l'ensemble de la structure de l'atmosphère urbaine apparaît comme un large dôme courbé sur l'ensemble de la masse urbaine. Cette masse est appelée « couche limite urbaine » dont les caractéristiques sont régies par la nature de la surface urbaine générale [Glockner, 2000].



**Figure I-12** : Structure de la couche limite urbaine et la canopée urbaine  
(Source : Glockner, 2000)

Plusieurs facteurs se combinent pour concourir à l'apparition des îlots de chaleur urbains. En plus du climat local, influencé par la topographie du site et les différents paramètres météorologiques comme la température, l'humidité relative et le vent, plusieurs facteurs de

source anthropique favorisent l'émergence et l'intensification de ce phénomène [Canorel, 2009], dont on peut citer :

- **la chaleur anthropique** : la production de chaleur anthropique telle que la chaleur émise par les véhicules, le chauffage, les climatiseurs et l'activité industrielle, est un facteur, contribuant au développement d'îlots de chaleur, notamment dans les milieux urbains denses où les activités se concentrent [USEPA, 2008].
- **Les émissions de gaz à effet de serre** : les gaz à effet de serre (GES) piègent l'énergie solaire dans l'atmosphère et participent ainsi à son réchauffement. Selon le GIEC : « la poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI<sup>e</sup> siècle. Il est très probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XX<sup>e</sup> siècle » [Pachauri et Reisinger, 2007]. Dans les milieux urbains, les sources d'émission de gaz à effet de serre sont principalement les véhicules, les procédés industriels et le chauffage des immeubles à l'aide de combustibles fossiles [MDDEP, 2006].
- **Les propriétés thermiques des matériaux** : les revêtements imperméables et les matériaux des bâtiments influencent le microclimat et les conditions de confort thermique, car ils absorbent beaucoup de chaleur durant le jour qu'ils rediffusent à l'atmosphère pendant la nuit, contribuant ainsi à l'effet d'îlot thermique urbain [Asaeda et al., 1994]. Ces matériaux à bas albédo peuvent atteindre des températures de 80 °C en été [Liébard et DeHerde, 2005]. Les architectes choisissent les matériaux selon différentes exigences techniques en fonction, entre autres, des besoins de sécurité et de durabilité et des coûts et négligeraient généralement les considérations environnementales [Luber et McGeehin, 2008; Frazer, 2005; Brattebo et Booth, 2003].
- **l'imperméabilité des matériaux** : l'intensification de l'urbanisation des dernières décennies a aussi provoqué la modification des types de recouvrement des sols. Les sols naturels ont été remplacés par des matériaux imperméables, tels que l'asphalte et les matériaux utilisés pour la construction des bâtiments qui, n'assurant pas de fonctions de filtration et d'absorption de l'eau, modifient le parcours naturel des eaux pluviales [Rushtone, 2001; Coutts et al, 2008; Mailhot et Duchesne, 2005]. En effet, dans les villes le taux d'infiltration des sols est seulement de 15 % et la quantité ruisselée de 55 %, tandis qu'en milieu naturel environ 50 % des eaux de pluie sont infiltrées dans le sol et 10 % ruissellent vers les cours d'eau [USEPA, 2007; Cyr et al, 1998]. En minimisant la disponibilité de l'eau en milieu urbain, les processus naturels rafraîchissants, comme l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et l'évapotranspiration de la végétation, sont restreints et ne peuvent pallier le réchauffement urbain [Brattebo et Booth, 2003].

- **la perte progressive du couvert végétal dans les milieux urbains** : le couvert végétal urbain est en diminution. La densification progressive des villes et le développement des infrastructures urbaines ces dernières décennies en sont les causes principales. Cette perte de végétation implique une perte de fraîcheur en milieu urbain. En effet, la végétation joue un rôle essentiel de protection contre la chaleur grâce au phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage des sols et des bâtiments. Au cours du processus naturel d'évapotranspiration des végétaux, l'air ambiant se refroidit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation de l'eau. La végétation participe également à une bonne gestion des eaux pluviales et à une meilleure qualité de l'air dans les villes [Bolund et Hunhammar, 1999; Cavayas et Baudouin, 2008; Akbari et al., 2001; English et al., 2007].

**-la morphologie urbaine** : elle se rapporte aux formes tridimensionnelles, à l'orientation et à l'espacement entre les bâtiments [USEPA, 2008]. Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent nuire à la bonne ventilation des centres urbains, car ils créent des canyons où s'accumule la chaleur occasionnée par le rayonnement solaire et les activités humaines [Coutts et al, 2008]. En effet, la réduction du facteur de vue du ciel limite les pertes radiatives nettes des bâtiments et des rues [Pigeon et al, 2008].

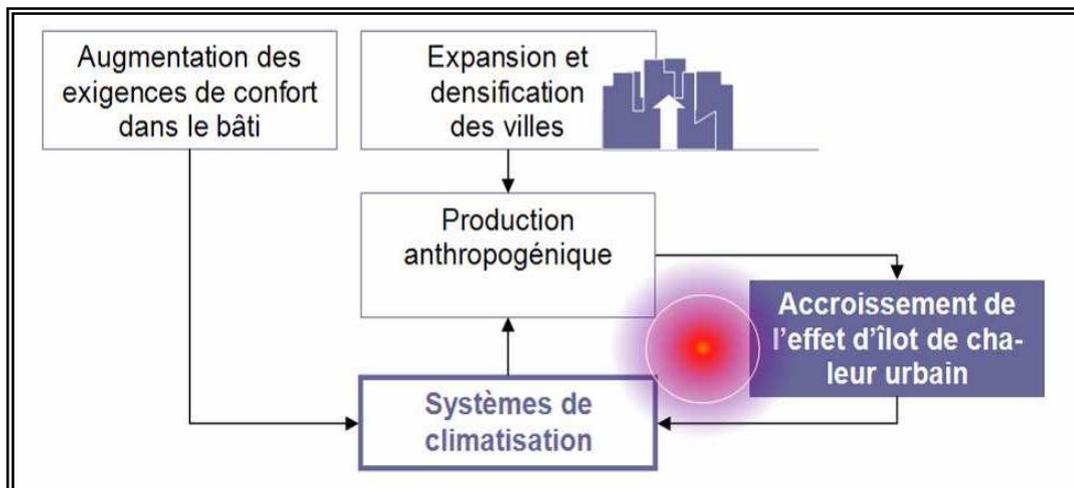
**- la taille de la ville** : le nombre d'habitants et la taille de la ville sont des paramètres essentiels de l'existence d'un îlot de chaleur. Dans les villes dont la population atteint 500 000 à un million d'habitants, la température de l'air est généralement supérieure de 1.1 à 1.2 °C par rapport à la zone rurale environnante [ONU, World urbanisation Prospects, 2003]. Dans les villes de plus d'un million habitants cet écart passe à 1.2 voire 1.5°C. Cependant, ce sont des valeurs moyennes et les écarts maximaux peuvent être plus importants [ONU, World urbanization Prospects, 2003]. Selon l'ONU, les populations urbaines représentaient 29.1% de la population mondiale en 1950, dont 48.3% en 2003. Le phénomène est plus marqué dans les pays développés, où se situe la majeure partie des données sur le réchauffement : l'urbanisation concerne ici 74.5 % de l'occupation humaine en 2003 (52.5% en 1950) [ONU, 2003].

La climatisation peut entraîner des impacts accentuant le phénomène d'îlot de chaleur urbain. De façon générale, la climatisation à grande échelle peut occasionner :

- une grande demande en énergie, en particulier aux heures de pointe, en opposition avec les principes d'efficacité énergétique [Déoux, 2004].
- la production de chaleur anthropique par extraction de l'air chaud de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur du bâtiment. De plus, le processus de climatisation [compression et condensation] émet de la chaleur [Lachal et al, 2004; Bourque et Simonet, 2007];

- l'émission de gaz à effet de serre (CFC, HCFC, HFC) causée par l'utilisation de fluides frigorigènes nocifs, dont le taux annuel de fuite atteindrait environ 10 % pour les climatiseurs individuels et 15 % pour les climatisations centralisées [Déoux, 2004];
- la dégradation de la qualité de l'air et certaines de ses conséquences sur la santé humaine, principalement en raison du risque de dissémination des bactéries Légionellose<sup>8</sup>, associé surtout aux climatiseurs industriels [Déoux, 2004] et
- l'augmentation de la pollution sonore que crée le bruit de certains systèmes de climatisation [Salamon et Aubert, 2004].

À la lumière des conséquences de l'utilisation de la climatisation à grande échelle, dont certaines ont été rapportées ci-dessus, elle ne saurait être considérée comme un moyen pour pallier à l'effet de l'îlot de chaleur urbain encore moins de régler les défauts de conception ou les erreurs de gestion d'un bâtiment [Dixsaut, 2005].



**Figure I-13** : Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation  
(Source : Bozonnet, 2006)

Dans le but d'envisager des solutions efficaces, un ensemble de travaux de recherche a été réalisées, ouvrant de nombreux axes sur des applications et des perspectives dans l'étude énergétique des bâtiments et des microclimats urbains. Ainsi, des études sur les compléments à la climatisation (les systèmes de rafraîchissement passifs), optimisation de systèmes et de matériaux de construction, traitement du microclimat urbain et des surfaces urbaines, ont été faites. On peut citer celle réalisée par Akbari et al en 1997 qui affirme que des réductions de

<sup>8</sup> La légionellose est une infection bactérienne pulmonaire causée par des bactéries du genre *Legionella*. Les légionelles sont des bactéries hydro telluriques présentes dans le milieu naturel : eaux douces, sols humides, réseaux publics de distribution, etc. Leur survie dans l'environnement est liée à des conditions de température (5-25 °C) et de pH du milieu, à la présence de nutriments et d'une flore microbienne (amibes libres et protozoaires ciliés). Les conditions de leur prolifération dans les sites hydriques artificiels, réseaux d'eau chaude, tours aérorefrigérantes, autres installations (bains à remous, balnéothérapies, humidificateurs, fontaines décoratives, etc)[Avril JL, Dabernat H, Denis F, Monteil H(1992): «Legionela. In: ellipses », éditeur Bactériologie clinique.]

consommation d'énergie due à la climatisation peuvent être réalisées par l'augmentation de l'albédo de surface de toits de bâtiments (toit isolé ou non) [Santamouris et al, 2001]. Les résultats résumés dans le tableau ci-après sont obtenus à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS, en vue de trouver une solution pour les pointes estivales dues à la climatisation [Braganca et al, 2007].

Place	Cooling load (KWh/m2) Base case (SR=0.2)	Cooling load (KWh/m2) increase albedo case 1(bâtiment sans isolation Base case (SR=0.62)	Cooling load (KWh/m2) Increase albedo case2( bâtiment bien isolé) Base case (SR=0.85)
ABU DHABI	265.4	236	217
MIAMI	117.7	92.4	76.7
CAIRE	104.5	84.6	72.4
ATHENS	58	43.3	34.6
SYDNEY	37.7	24.3	16.8

**Tableau I-03** : calcul de la charge électrique due à la climatisation selon la reflectance de la toiture (Source : Braganca et al, 2007)

## I-2-4- Les engagements internationaux

### I-2-4-1- Le protocole de Montréal

Depuis la mise en évidence expérimentale par des chercheurs Anglais et Japonais, en 1985, d'un trou indubitable dans la couche d'Ozone sur l'Antarctique, dont la rupture est imputable à de nombreux gaz, principalement ceux qui contiennent du chlore (à usage énergétique) [Gicquel, 2009].

Conscients de l'impact négatif sur l'environnement des Chlorofluorocarbones (CFC), les producteurs industriels ont mené des recherches pour mettre au point des produits de substitution indispensables pour l'industrie de la réfrigération et de la climatisation [Gicquel, 2009].

Le premier accord international conclu en la matière est le protocole de Montréal qui a pris effet en 1989, où il a été décidé le gel de la consommation des CFC au niveau de 1986, suivi d'une réduction de 20% en 1993 et 30% en 1999. Le mouvement s'est ensuite poursuivi, dès 1990, à Londres, les scientifiques se sont entendus à un amendement induisant à une accélération du processus, avec l'objectif de bannissement pur et simple à partir de l'an 2000

pour tous les CFC et les Halons et une remise en cause de HCFC du fait qu'il contient toujours du Chlore. [Gicquel, 2009].

Le règlement de la commission Européenne de mars 1991 prévoyait l'arrêt de la production et de la consommation de CFC le 1<sup>er</sup> Juin 1997. En Novembre 1992, à Copenhague, un nouvel amendement avançait encore cette date au 1<sup>er</sup> Janvier 1996[Gicquel, 2009].

#### **I-2-4- 2-Le protocole de Kyoto**

En juin 1997, à Kyoto, la Convention sur le climat adopte un protocole engageant les pays à réduire ou à limiter l'émission globale de six Gaz à Effet de Serre (GES) : CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, PFC, HFC, SF<sub>6</sub>. En moyenne, ce protocole engage les pays industrialisés à réduire leurs émissions de 5.2% par rapport à 1990 (année de référence) et ceci pour la période 2008-2012. Les pays "en transition" ont la possibilité de choisir une autre année de référence. Ces émissions se réfèrent à une concentration en équivalent-CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire une quantité totale de CO<sub>2</sub> qui aurait le même impact d'intensification de l'effet de serre que l'ensemble des gaz considérés. En 1990, les émissions de GES pour les pays concernés par le protocole de Kyoto s'élevaient à 16,2 milliards de tonnes d'équivalent-CO<sub>2</sub>, dont 5,8 pour les Etats Unis, 4 pour l'Europe, 3 pour la Russie, 1.2 pour le Japon, 0.6 pour le Canada et 0.5 pour l'Australie [Kempf, 2005].

#### **I-2-5- Confort thermique – climatisation et énergie**

La recherche du "bien-être" (well-being) n'est pas une préoccupation récente pour l'être humain bien qu'apparaissant seulement dans les théories psychologiques au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Diener (1984) souligne qu'à travers l'histoire, de nombreux philosophes ont considéré la recherche du bonheur comme étant la motivation la plus importante des actions de l'être humain. Plus récemment, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS-WHO) dans l'agenda 21, souligne l'importance de développer des interventions visant à améliorer la qualité de vie de la population générale. La qualité de vie est définie comme : « ... a broad ranging concept affected in a complex way by the person's physical health, psychological state, level of independence, social relationships and their relationship to the salient features in their environment » [WHOQOL Group, 1993].

Le confort thermique est une composante importante du bien-être de l'individu dans un environnement construit. L'interaction individu et environnement est soumise à des influences très complexes et a généré de nombreuses études physiologiques, et psychophysiques [Nicol, 1981; Humphreys, 1981; Nicol et al, 1993]. Le confort thermique défini comme un état d'esprit

qui exprime le degré de satisfaction par rapport à l'environnement a été l'objet d'évaluations, de mesures diverses et a été à l'origine de nombreux développements théoriques (par exemple ASHRAE, 1966; Fanger, 1970).

Nicol et al (1993) ont développé une « approche adaptative » de l'état de confort thermique [Nicol et al, 1993], qui ne part pas des échanges entre l'homme et son environnement, mais de l'observation des actions, que l'individu peut développer pour atteindre un confort thermique optimal. Ces actions sont classées de quatre types [Gerber, 2008] :

- modifier la production de chaleur interne
- modifier le taux de perte de chaleur corporelle
- modifier l'environnement au niveau thermique
- sélectionner différents environnements.

Ces stratégies ont été décrites dans le contexte de la recherche d'une température plus élevée, mais elles pourraient également ouvrir des pistes intéressantes en matière de stratégies de rafraîchissement. Elles reposent sur le postulat que si on donne aux individus suffisamment de temps, ils parviendront à développer de nouvelles stratégies pour s'adapter à n'importe quelle température aussi longtemps que cette dernière ne devienne pas menaçante ou dangereuse [Gerber, 2008].

Nicol et al. (1993) notent également que l'inconfort apparaît lorsque la température :

- change trop rapidement
- se situe en dehors des limites habituellement acceptables
- est inattendue

### **I-2-5-1-Aspects subjectifs du confort thermique et climatisation**

Selon l'enquête réalisée par l'Université de LAUSANNE en 2008, Certains considèrent la climatisation comme une « luxe inutile » auquel ils ne désirent pas faire recours. Seules les personnes travaillant dans des locaux extrêmement inconfortables accueillaient la climatisation positivement, si aucune alternative ne peut être trouvée. Les effets négatifs sur la santé et l'environnement de la climatisation, ainsi que ses coûts énergétiques et financiers élevés, d'autres aspects sont relevés (choc thermique entre la température intérieure et extérieure pouvant causer des maladies, des maux de tête, des rhumes, des refroidissements, le fait que certaines installations sont bruyantes, la nécessité de s'habiller « chaudement » en été, l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres, l'apport de bactéries indésirables, la consommation

énergétique et le rejet de chaleur à l'extérieur, la pollution). Ils rendent cette solution illogique et contraire à l'idée que l'homme doit ou peut s'adapter à son environnement [Gerber, 2008].

Quant à la consommation d'énergie due à la climatisation, il existe des mesures intéressantes et pertinentes, mais elles ne sont certainement pas suffisantes pour prévenir le gaspillage d'énergie. En effet, elles doivent être modulées selon les différents groupes de populations concernés (familles, enfants, personnes âgées, etc.) avec des messages ciblés et appropriés à leurs priorités et besoins de consommation respectifs. Elles doivent également tenir compte des intérêts et des contraintes ou objectifs propres à chaque groupe (financiers, sanitaires, problématiques propres, niveau d'activité physique, fonctionnement physiologique, etc.). Des bases théoriques psychologiques relatives aux comportements et aux attentes face à la climatisation sont quasi inexistantes et pauvres lorsque l'on se réfère à la littérature scientifique des deux dernières décennies [Gerber, 2008].

Il existe des études plus anciennes, datant de la fin des années 1970. Seligman (1977) a réalisé des recherches qui ont permis de confirmer l'hypothèse suivante: un feedback sur la consommation d'énergie liée à la climatisation diminue son utilisation [Seligman, 1977]. Il a également montré que l'installation de « signaling devices », indiquant si la température extérieure est suffisamment basse pour que l'ouverture des fenêtres suffise à refroidir les locaux, s'est révélé être une mesure efficace [Gerber, 2008].

Les informations sur la consommation d'énergie ont également été mises en évidence comme un aspect important [Pallack et Cummings, 1976], ainsi que les informations sur le prix de l'énergie [Kantola, Syme et Campbell, 1984]. La réduction du prix de l'électricité comme incitation positive a été testée avec succès [Winnett et coll., 1978].

Toutefois, une étude plus récente [Gheorghiu, 2003] aborde la notion de « warmth suggestibility », un indice psychométrique mesurant le degré d'influçabilité par les pairs quant à la sensation du chaud ou du froid. Cette étude souligne l'importance de la dimension sociale dans la gestion de la température environnementale.

La théorie de Rotter (1975) [Rotter, 1975], cité par Huteau (1995) [Huteau,1995] sur le « locus of control » consiste à distinguer les individus qui considèrent qu'ils sont à l'origine de ce qui leur arrive (locus interne) de ceux qui considèrent que ce qui leur arrive dépend du hasard ou des autres (locus externe). Cette notion de contrôle est un concept important : dont le

sentiment de maîtrise et de contrôle renforce le sentiment de confort thermique (pour une même température donnée).

Enfin, il y a consensus qu'en période estivale, le fait d'accroître le degré de contrôle de l'occupant envers son environnement permet des économies d'énergie en raison d'un meilleur arrimage entre les besoins et la consommation énergétique [Hawkes, 1982]. Dans ce sens, tout en satisfaisant le confort des occupants en période estivale, des normes plus flexibles qui permettent un ajustement du point de consigne en fonction des conditions météorologiques permettraient ainsi d'économiser de l'énergie associée à la climatisation mécanique des bâtiments [Boivin, 2007].

### **I-3- La problématique de recherche**

En ce début du XXIème siècle, nous sommes donc confrontés à une double problématique: celle du réchauffement climatique qui menace notre survie sur terre et celle de la pénurie en énergie fossile.

Actuellement, l'Algérie a enregistré une utilisation massive des moyens de climatisation au sud même au nord du pays dans le secteur résidentiel et tertiaire, ayant pour objectif la réduction de la surchauffe. Le recours systématique à ces installations n'est pas fait pour arranger ni la facture énergétique ni le confort encore moins l'esthétique de l'enveloppe extérieure du bâtiment. De plus, L'intégration de la composante énergétique dans le bâtiment (la protection contre les apports solaires excessifs en été et l'isolation des parois...) demeure méconnue dans la conception.

À long terme, les impacts de l'effet de serre devraient accentuer la demande en cette matière. Mais, sauf découvertes ou progrès technologiques majeurs en matière énergétique, le développement de la climatisation sera contrarié par l'épuisement progressif des ressources d'énergie fossile.

Dans le contexte actuel de préoccupations hygiéniques, énergétiques, économiques et environnementales, on peut donc se poser la question suivante : faut-il réduire nos besoins par la maîtrise de l'énergie (réduire les postes consommateurs : climatisation) sans compromettre la qualité des ambiances thermiques intérieures ou bien chercher des sources d'énergie de substitution ?

La réponse est simple : il faut faire les deux. Dans la situation actuelle, il faut d'abord maîtriser l'énergie puis rechercher des solutions énergétiques de substitutions pérennes capables

de satisfaire les besoins de confort du plus grand nombre. Il existe d'autres voies et solutions alternatives à faible consommation d'énergie basées sur les énergies renouvelables tirées en grande partie à travers les savoir-faire et les pratiques ancestrales en matière de construction. C'est pourquoi, il faut dès aujourd'hui réactualiser ces acquis pour préparer une transition énergétique plus sereine, fondés avant tout sur le bon sens.

A ce stade, on se propose d'étudier l'intégration d'une énergie propre qu'est l'énergie géothermique très basse température (dite de surface) dans une architecture qui se préoccupe de paramètres qui conditionnent le bien-être de l'occupant afin de limiter le recours à la climatisation conventionnelle.

Dans le but d'intégrer soigneusement cette énergie dans le bâtiment, la question qui reste à poser est comment matérialiser une telle combinaison : énergie géothermique de surface - bâtiment, par rapport à la satisfaction du confort des occupants, en réduisant les risques pour leur santé tout en prenant en considération l'économie d'énergie ?

#### **I-4- Les hypothèses**

L'approche bioclimatique en architecture, telle qu'avancée par Olgyay dans les années 60, permet de profiter du potentiel des forces de la nature afin de créer de meilleures conditions de vie dans le bâtiment. Cette symbiose entre le bâtiment et son environnement immédiat est possible si le concepteur sait maîtriser l'interaction des variables climatiques, biologiques, technologiques et architecturales [Olgyay, 1963]. La ventilation est utilisée en approche bioclimatique pour procurer l'air frais nécessaire aux occupants pour leur santé et contrôler la température pour leur confort. Cette stratégie s'avère efficace à contrôler les surchauffes des bâtiments. La solution de ventilation retenue pour le bâtiment est celle qui assure la meilleure maîtrise des flux d'air échangés, à la fois du point de vue hygiéniques et thermiques. Différents dispositifs techniques, associés à une ventilation mécanique contrôlée, permettent de limiter les échanges thermiques avec l'extérieur. Il s'agit principalement des échangeurs air-sol ou puits provençal, qui constitue la technique la plus appropriée pour l'intégration de l'énergie géothermique de surface dans le bâtiment pour répondre aux besoins de rafraîchissement.

Ce système peut être modélisé en phase de préconcept d'un projet de bâtiment, par le moyen d'outil d'aide à la conception, simplifié à un degré de précision suffisant pour estimer adéquatement les principales caractéristiques géométriques et sa performance pour répondre aux besoins de rafraîchissement.

## I-5- Les Objectifs

Les objectifs de notre recherche sont les suivants :

- Trouver une solution alternative à la climatisation conventionnelle, plus durable tant pour l'environnement que pour la santé des générations actuelles et futures.
- Réduire les coûts des investissements énergétiques, notamment en matière de climatisation ;
- Préserver les ressources énergétiques conventionnelles et réduire leurs impacts sur l'environnement ;
- Avec l'émergence des enjeux de développement durable, nous cherchons à expliquer les principes de l'architecture bioclimatique ;
- Le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables et sa matérialisation dans le secteur du bâtiment.

## I-6- La démarche de travail

Le sujet ciblé par notre recherche concerne l'intégration des énergies renouvelables, voir la géothermie de surface pour un bâtiment et un climat spécifique donnés, afin d'évaluer le potentiel de rafraîchissement par le puits provençal, système apparenté à la démarche environnemental dans le bâtiment.

Afin de répondre à notre problématique et d'atteindre nos objectifs nous avons organisé notre mémoire en cinq chapitres, structurés comme suit :

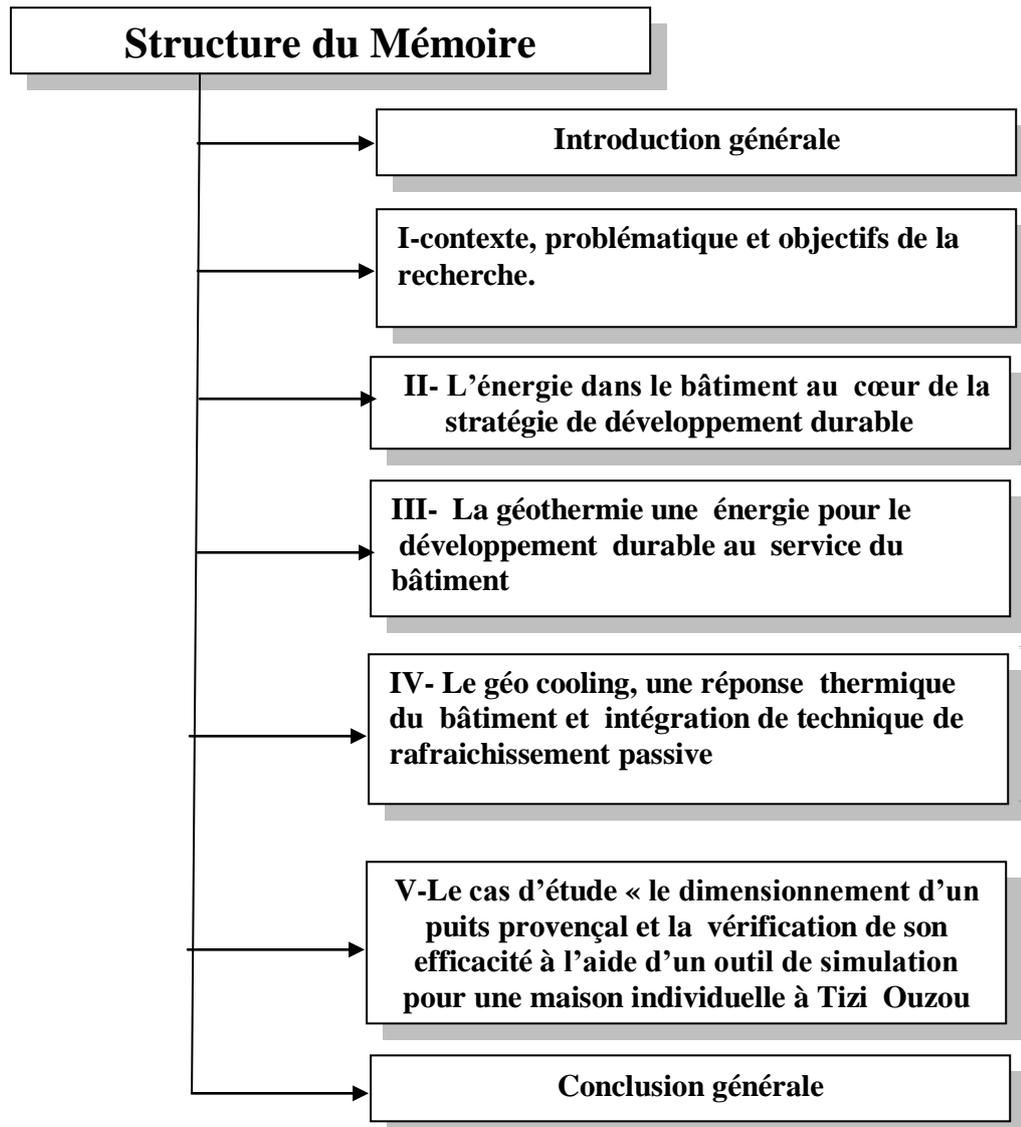
**Le chapitre I** présente le **contexte, problématique et les objectifs de la recherche**. Dans ce chapitre nous allons définir les impacts de la climatisation à différentes échelles : de l'échelle planétaire jusqu'à l'échelle de l'individu, face aux contextes énergétiques et environnementaux actuels, et ce, pour bien cerner la problématique de notre recherche.

**Le chapitre II** traite le cadre général de notre travail qui porte sur l'énergie dans le bâtiment au cœur de la stratégie de développement durable. Ce chapitre définit le cadre réglementaire de l'énergie et introduit les différents concepts pour intégrer et améliorer la performance énergétique des bâtiments, qui se réalise en faisant appel aux énergies renouvelables et aux principes de l'architecture bioclimatique, dans la mesure où ces concepts sont totalement cohérents avec la stratégie de développement durable appliquée aux bâtiments.

**Le chapitre III** intervient pour appuyer et mener à terme les directives de la politique nationale de maîtrise d'énergie, basée essentiellement sur la promotion, la valorisation et le développement des énergies renouvelables, notamment la géothermie, caractérisée par un potentiel très important dont son exploitation est très limitée. La géothermie pourra constituer une énergie de substitution aux énergies fossiles, et ce, à travers ses caractéristiques comme elle constitue une énergie prometteuse pour réduire les besoins en matière de climatisation dans le bâtiment.

**Le chapitre IV** traite de la méthode d'intégration de l'énergie géothermique de surface dans le bâtiment pour répondre aux besoins de rafraîchissement, à travers un état de l'art, dont **le geocooling constitue la technique la plus appropriée pour l'exploitation de cette ressource.** Cette technique de rafraîchissement passif consiste à utiliser l'inertie thermique du sol pour rafraîchir l'air insufflé dans le bâtiment à l'aide d'un échangeur air/sol (le puits provençal).

**Le chapitre V** concerne la partie expérimentale, en vue d'adapter ce système à un cas d'étude (maison individuelle à Tizi Ouzou). Dans ce chapitre on va décrire l'aspect constructif de cette maison (les caractéristiques des matériaux de construction), l'orientation, l'adaptation par rapport au climat (son influence sur l'ambiance en été). A cet effet, des mesures de température de l'air ambiant ont été faites. Ces données vont servir pour le dimensionnement du puits provençal afin de répondre aux besoins en matière de confort d'été.



## **II-1- Introduction**

Rappelons que la consommation d'énergie domestique à travers le monde a connu plusieurs époques : de 1950 à 1970, c'était les années du "tout pétrole" où l'énergie est bon marché [Liebard et de Herde, 2005]. On construisait sans soucis des pertes thermiques, donc on chauffait. Suite à la succession des chocs pétroliers de 1973 et 1979, l'énergie abondante à bon marché, est devenue un bien rare et cher. Depuis, un grand intérêt a été porté à la question de la maîtrise d'énergie, considérée comme un pilier fondamental du développement durable [Liebard et de Herde, 2005], surtout que l'amélioration de la consommation énergétique finale d'un point par an (1%) induira une économie dépassant 55 Mtep sur la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. De plus, ceci revient à éviter 100 millions de tonnes d'émission du CO<sub>2</sub> par an [Medjelekh, 2006].

Dans cette optique, la conception d'un « bâtiment responsable » se doit d'offrir un équilibre entre sa performance thermique et la qualité de l'environnement intérieur en termes de confort thermique et de santé des occupants [Allard, 1998]. Pour ce faire, il convient de réfléchir, dans la phase de conception aux différentes possibilités, de réduction de postes énergétiques ainsi que le développement et la mise au point de systèmes énergétiques intégrant les énergies renouvelables disponibles sur les sites de construction (construction adaptée au site et au climat), en conciliant un souci de rentabilité économique, le confort de l'occupant, la volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre les dérèglements climatiques.

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- définir le cadre réglementaire de l'énergie ;
- définir l'architecture bioclimatique ;
- définir la performance énergétique des bâtiments qui s'inscrit dans la stratégie de maîtrise d'énergie, visant l'économie d'énergie et la limitation des émissions de gaz à effet de serre.

## **II-2- Les enjeux de développement durable pour l'énergie**

### **II-2-1-Aperçu historique sur le concept de développement durable**

Une quarantaine d'années nous séparent de l'émergence du concept de développement durable. Tout a commencé véritablement dans les années 1960, avec les premières critiques du mode de croissance productiviste. Le club de Rome, fondateur de ce mouvement (1968) lance

un cri d'alarme sur le constat de la dégradation de l'éco système par la croissance économique, avec le slogan « croissance zéro » [Morillon, 2005].

En 1971, les 24 pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) proclamant le principe de pollueur – payeur. En 1972, ils commandent une étude à une équipe du Massachusetts Institut of technology (M.I.T). Ces chercheurs publient un ouvrage qui a pour titre : Halte à la croissance « The limit of growth ». [Morillon, 2005].

Face à la montée des mouvements sociaux, qui intègrent largement les préoccupations environnementales, les premiers ministères de l'environnement sont créés au sein de différents gouvernements nationaux. [Morillon, 2005].

C'est dans ce climat de confrontation entre l'écologie et l'économie, que se tient la conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972 à Stockholm, en Suède des thèmes centraux de la conférence étaient [Wiesenfeld, 2005] :

- L'interdépendance entre les êtres humains et l'environnement naturel.
- Les liens entre le développement économique et social et la protection de l'environnement.
- La nécessité d'une vision mondiale et de principes communs.

Au cours des années 1980, le grand public découvre les pluies acides, le trou dans la couche d'ozone, l'effet de serre, la déforestation et la catastrophe de Tchernobyl. Dès 1980 [Wiesenfeld, 2005], l'Union Mondiale pour la Nature (UICN) parle pour la première fois de Sustainable Development traduit à l'époque par développement soutenable. En 1983, l'Organisation des Nations Unies (ONU), demande à **Mme Gro Harlen Bruntland** (ex-chef du gouvernement de Norvège) de présider une commission indépendante chargée d'enquête sur la question de l'environnement et de développement [CHERQUI, 2005].

En 1987, cette commission remet un rapport dit « rapport Bruntland » qui a pour titre Our Common Futur « notre avenir à tous ». Ce rapport introduit une rupture fondatrice dans la conception des gouvernements sur les relations entre l'environnement et les politiques publiques et prône le concept de « Sustainable Development », développement soutenable ou développement durable. Reprenant ces thèmes, la commission mondiale sur l'environnement et le développement durable, a rendu en 1987 un rapport demandant un développement qui permet de répondre aux besoins du présent sans compromettre les possibilités des générations

futures à satisfaire leur propre développement. Donc le développement durable n'est pas un état fixe d'harmonie, mais plutôt un processus d'évolution durant lequel l'exploitation des ressources, l'orientation des investissements, l'avancement du développement technologique et les transformations institutionnelles sont conformes à nos besoins aussi bien futurs que présents. [CHERQUI, 2005].

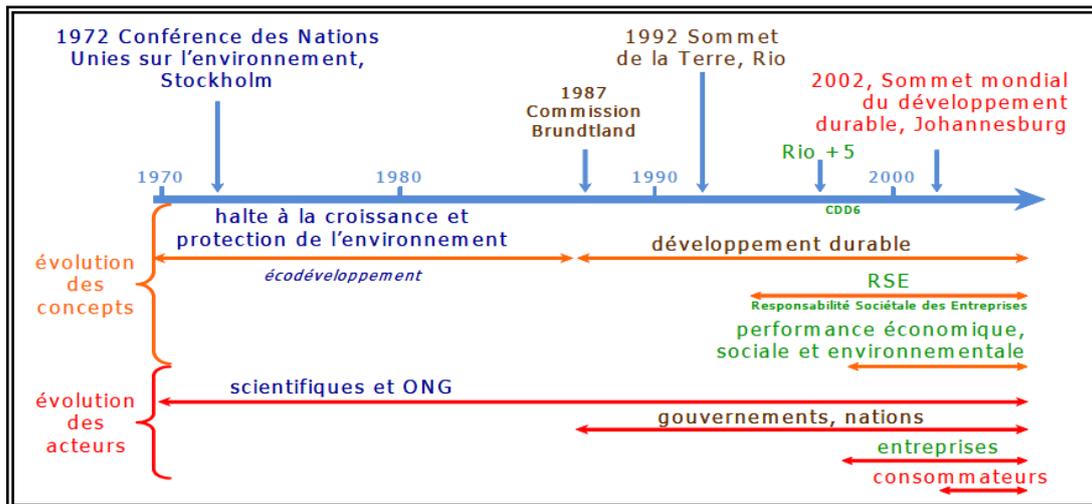
Depuis la prise de conscience sur l'impact négatif sur l'environnement des chlorofluorocarbones (CFC), le premier accord international conclu en la matière est le protocole de Montréal qui a pris effet en 1989, le mouvement poursuivi à Londres 1991 puis en Novembre 1992 à Copenhague, dont les Etats membres se sont engagés pour la suppression de la consommation et la production de CFC et arrêt de la consommation des HCFC [Gicquel, 2009].

En juin 1992, le sommet de la Terre à Rio de Janeiro organisé par les Nations Unies consacré au développement durable, a donné naissance à l'agenda 21, vaste programme d'action fixant des objectifs et décrivant des moyens et des politiques, permettant d'atteindre un développement Durable. Depuis cette date le concept du développement durable a été adopté dans le monde entier. L'objectif de ce sommet est de faire entrer l'environnement au coeur de processus de décision, pour cela 27 principes sont établis et trois conventions en ont découlé :

- la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, sa mise en oeuvre prend forme par le protocole de Kyoto, signé lors de la troisième session de la Conférence des Parties, le 11 décembre 1997, entré en vigueur depuis 16 février 2005 qui fixe l'engagement des pays développés à réduire le total de leurs émissions agrégées de 6 gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC et SF<sub>6</sub>) d'au moins 5,2 %, au cours de la période 2008-2012, par rapport au niveau de 1990, [Kempf, 2005].
- la convention sur la diversité biologique, vise à protéger l'ensemble de la diversité des vivants et l'usage durable des ressources, ainsi qu'un partage équitable des bénéfices qui en résultent, cette convention a donné lieu à la signature du protocole de Carthagène sur la biosécurité [Andre et al, 2003].
- la convention sur la lutte contre la désertification signée deux ans après, à Rio.

Depuis Rio, de nombreux débats mondiaux ont eu lieu, notamment celles sur l'effet de serre et la biodiversité, la conférence de Johannesburg (septembre 2002) a continué les actions entreprises [CDER, 2002]. L'objectif étant d'impliquer progressivement les acteurs de plus en

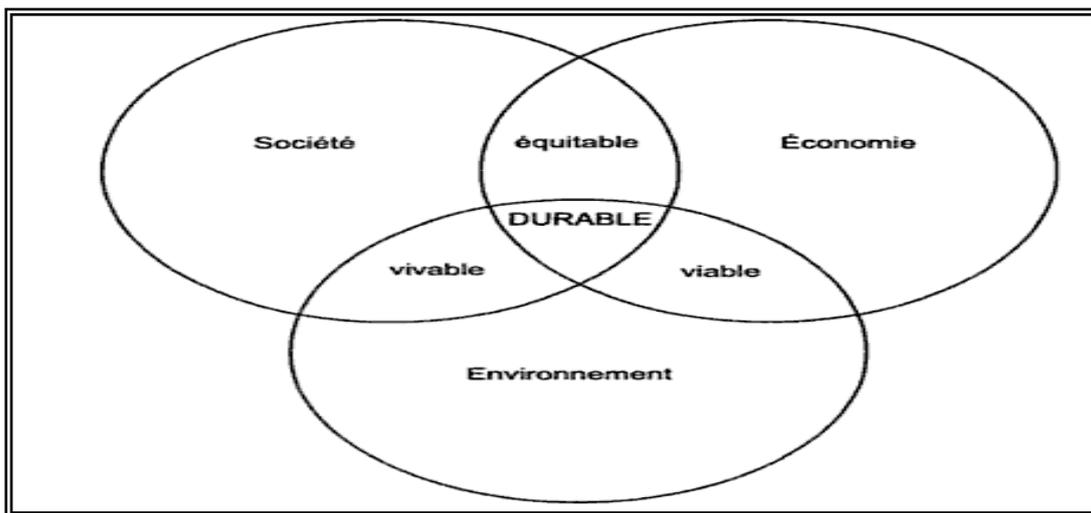
plus localement, en invitant chacun à une réflexion individuelle et à de meilleures pratiques, qui pourront localement faire évoluer des problématiques globales.



**Figure II-01 : Grandes dates du développement durable**  
Source : (Brodhag ,2004)

## II-2-2-Définition du concept de développement durable

"Développement Durable" est la traduction française officielle du terme anglo-saxon "Sustainable Development", ce dernier n'ayant pas de correspondance exacte en français. Il est souvent présenté comme la recherche d'un équilibre entre trois pôles : le social, l'environnemental et l'économique [CHERQUI, 2005].



**Figure II-02 : Les trois piliers du développement durable**  
(Source : CHERQUI, 2005)

Donc le développement durable : « c'est un développement social, économique et politique qui répond aux besoins présents sans compromettre la capacité des génération futures à satisfaire leur propre développement » [Chatelet et al, 1998].

### **II-2-3- Le développement durable et énergie**

Le développement énergétique durable peut être défini comme l'art de concilier deux exigences [Despretz, 2004]:

- la satisfaction des besoins énergétiques actuels, liés au confort et au développement économique.
- le respect de l'environnement et la préservation des ressources et de la capacité au « bien-être énergétique » pour les générations futures.

Il conviendra donc d'être attentif à la préservation de l'environnement en évitant les pollutions chimiques ou radioactives irréversibles, en économisant les ressources fossiles non renouvelables, et en maîtrisant nos consommations d'énergie et nos émissions de gaz à effet de serre.

Un développement énergétique durable implique donc trois priorités [Despretz, 2004]:

- mener une politique active d'économie d'énergie ;
- développer l'utilisation des énergies renouvelables non productrices de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ;
- rechercher de nouvelles sources d'énergie permettant une plus grande efficacité et une indépendance optimale du pays tout en permettant une sécurité d'utilisation et des impacts sur l'environnement acceptable. Le débat sur la production d'électricité d'origine nucléaire reste ainsi largement ouvert et son issue dépendra de la manière dont seront traités la gestion des déchets radioactifs et le problème de la sûreté des installations.

### **II-2-4- Les développement durable et bâtiment**

Le concept de développement durable fait apparaître la nécessité dans son affirmation internationale officielle, d'une double solidarité : solidarité entre tous peuples de la planète et solidarité entre les générations. A cet effet, chaque secteur de la vie économique se trouve donc confronté à la responsabilité qui lui incombe dans la gestion globale des ressources et de l'environnement. Quant au secteur du bâtiment, le concepteur devra donc continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur, de plus, il devra faire en sorte que l'impact sur le bâtiment soit minimisé [Chatelet, 1998].

Ce concept recouvre à la fois, les impacts environnementaux directs et indirects des bâtiments qui sont en effet nombreux tout au long de son cycle de vie : 40 % de la

consommation d'énergie, 25 % des émissions de gaz à effet de serre, quinze mille carrières creusées en 50 ans pour fournir des granulats de construction, 20 à 25 millions de T/an de déchets de chantier de construction, 400 kg de déchets domestiques solides produits par habitant, pression urbaine et impact sur les écosystèmes et les paysages [Despretz, 2004]. D'autant plus, la qualité des bâtiments, la santé préservée, la qualité pour les riverains à l'interface entre le bâtiment et la ville, la qualité de travail et des chantiers pour les professionnels producteurs des bâtiments et, finalement, le droit au logement et à un cadre de vie urbain harmonieux. Il constitue une claire opportunité pour la requalification de l'offre de bâtiments. Le développement durable est utilisé aujourd'hui comme un nouveau repère pour aborder une grande variété de problèmes touchant au long terme à l'insertion de l'activité de l'homme dans l'environnement planétaire.

Avec l'évolution des idées et du concept de développement durable suite au mouvement général de remise en cause du productivisme des cinquante dernières années et dans la mouvance des mouvements des hippies et écologistes qui ont posé les jalons de réflexion sur l'essor de l'architecture solaire puis bioclimatique, on assiste depuis, à l'émergence d'un concept global qui fait intervenir en outre le lien avec la santé et la gestion des différentes étapes de la vie du bâtiment (chantier, déconstruction). On parle alors sur le "bâtiment durable" ou "le bâtiment vert" ou bien "le bâtiment à haute qualité environnemental", d'où l'aspect énergétique demeure une préoccupation centrale, ce qui nous amène aisément à s'intéresser au bâtiment performant, voir le "bâtiment à bas profil énergétique" [Chatelet et al, 1998] qui repose sur deux grands leviers qui améliorent l'efficacité énergétique dans le bâtiment [Morillon, 2005] :

- Le recours aux énergies renouvelables
- L'efficacité énergétique dans le bâtiment, qui se réalise à travers :
  - Le choix des matériaux, l'inertie de l'enveloppe et l'isolation
  - L'architecture bioclimatique

#### **II-2-4-1- Le recours aux énergies renouvelables**

L'énergie renouvelable appelée communément "énergie verte" est une source d'énergie qui est régénérée ou renouvelée naturellement selon un cycle relativement court à l'échelle humaine. Les cinq ressources d'énergie renouvelables sont [Morillon, 2005]:

- l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque) ;
- l'énergie hydraulique ;
- l'énergie éolienne ;
- la biomasse ;

- l'énergie géothermique et
- l'énergie marémotrice.

Les énergies renouvelables sont qualifiées "énergies de flux" du fait qu'elles sont constituées de gisements régénérables par opposition aux énergies de stock qui sont constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon ; gaz, uranium) [Morillon, 2005].

Les sources d'énergie renouvelables se différencient des énergies traditionnelles [Morillon, 2005] :

- elles sont inépuisables, non polluantes et gratuites;
- elle permet de préserver et de réserver des ressources précieuses à des utilisations plus valorisantes que la chaleur;
- elles sont exploitables sans produire de déchets, ni d'émissions polluantes;
- elles contribuent ainsi à la lutte contre l'aggravation de l'effet de serre.

L'énergie renouvelable peut contribuer à la réduction de la consommation d'énergie fossile du secteur du bâtiment, à travers diverses techniques :

#### - **l'énergie solaire**

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres, demeure la plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. L'énergie solaire peut être convertie en chaleur (l'architecture solaire passive, le chauffage et l'eau chaude sanitaire : capteur plan) ou en électricité (les centrales électriques thermiques solaires, l'électricité solaire photovoltaïque). A ce titre, l'énergie solaire permet de s'orienter vers l'autonomie énergétique à l'échelle du bâtiment [Wiesenfeld, 2005].

#### - **l'énergie éolienne**

La vitesse du vent dépend des facteurs qu'il est important de connaître, car la puissance d'une éolienne est proportionnelle à sa vitesse. Des composantes peuvent influencer : la pente (topographie du site) et la rugosité (nature de surface). depuis 1975, des éoliennes d'un nouveau type sont apparues, notamment pour fournir de l'électricité au moment du choc pétrolier. Elles sont en général une sorte d'hélices à 2 ou 3 pales tournant autour d'un axe horizontal. La puissance des éoliennes augmente avec les diamètres des pales et la surface balayée par les hélices. Elles sont destinées à la production d'électricité [Wiesenfeld, 2005].

**- la biomasse**

La fermentation anaérobie est l'un des processus qui contribue à la dégradation des matières organiques mortes et à leur transformation en éléments simples gazeux et minéraux. Elle se déroule en anaérobiose c'est-à-dire en absence totale d'air et d'oxygène. L'un des résultats est la formation de biogaz (bio carburant) qui est combustible, mélange de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. C'est donc un processus naturel sous l'action des bactéries. Ce phénomène se déroule à l'intérieur des cuves recouvertes d'un couvercle sous lequel s'accumule le biogaz qu'on soutire au fur et à mesure qu'il se produit [Wiesenfeld, 2005].

**- la géothermie**

L'essentiel de la chaleur dégagée par la terre provient de la radioactivité, énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Ce flux géothermique est si faible à la surface du globe qu'il ne peut être directement conservé et en réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous sol (nappes d'eau). A travers ces filières différentes voire la production de l'électricité et la chaleur ainsi que la variété de son gisement, qu'on va voir dans le prochain chapitre, la géothermie est une énergie prometteuse qui pourra être adaptée aux besoins du bâtiment (chauffage, climatisation...)[ Wiesenfeld, 2005].

La mise en place d'énergies renouvelables ne vaut qu'une fois que l'on a réussi à baisser les consommations énergétiques des bâtiments. En effet, les énergies renouvelables sont soumis à des dimensionnements d'échelle. Le choix des énergies renouvelables ne se fait que selon l'échelle à laquelle on se place. C'est pourquoi un travail en amont sur l'isolation et les matériaux est intéressant avant d'utiliser les énergies renouvelables.

## **II-2-4-2-Le choix des matériaux, l'inertie et l'isolation de l'enveloppe du bâtiment**

### **II-2-4-2-1-Le choix des matériaux "matériaux durables"**

Dans un projet de construction, le choix des matériaux a des implications environnementales, économiques ou sociales, immédiates à l'échelle locale (qualité de l'air intérieur, impacts sur les économies locales, diversité architecturale, respect des traditions, performances techniques des bâtiments, facilité de mise en œuvre et productivité sur les chantiers, durabilité et facilité d'entretien, ect...) mais aussi à plus long terme (réchauffement climatique, déchets, déforestation, impact économique des filières de fabrication, ect). La prise de conscience progressive de ces problématiques se traduit notamment par une évolution de la

démarche des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour choisir les matériaux de construction dans le cadre des projets de bâtiments "durables". Ainsi, les grilles de sélection vont aujourd'hui au-delà des critères classiques, économiques, de fonctionnalités ou d'habitudes du concepteur. Une approche plus "systémique" émerge notamment de la prise en compte de cycle de vie » et de "coût global", directement inspirée par le développement durable [Morillon, 2005].

Les éléments les plus novateurs de cette approche sont [Morillon, 2005]:

- la prise en compte des impacts environnementaux des matériaux produits, de l'amont (extraction, production) à l'aval (fin de vie lors de la démolition du bâtiment).
- une plus grande attention portée aux impacts sociaux, culturels et économiques des choix de matériaux (revitalisation de filière de production, technique de construction, accès au logement dans les pays pauvres, ect).
- une nouvelle manière d'aborder les aspects techniques en les traitants à la lumière de la contribution intrinsèque des matériaux aux objectifs de performance de l'ouvrage.

Le cadre normatif est de toute façon en train d'évoluer, obligeant tous les acteurs de la construction à être plus attentifs aux choix des matériaux et à leurs impacts. La société civile, elle aussi, est de plus en plus sensibilisée, notamment sur les enjeux liés à la qualité de l'air, et l'exercice d'une pression de plus en plus forte sur l'ensemble des acteurs [Morillon, 2005].

## **II-2-4-2-2-L'inertie de l'enveloppe du bâtiment**

### **II-2-4-2-2-1-Les principes de l'inertie thermique**

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker de l'énergie et de la restituer par la suite, traduite par sa capacité thermique [CERTU, 2003]. Elle exprime une "résistance" propre à un changement d'état ou de régime, donc à des phénomènes dynamiques [BONHOMME, 1986]. Elle est utilisée en construction pour atténuer les variations de température extérieure ou les variations de flux dissipés à l'intérieur du bâtiment [benchikh, 2007]. Elle permet de limiter les effets d'une variation "rapide" de la température extérieure sur le climat intérieur par un déphasage entre la température extérieure et la température de surface intérieure des murs et par amortissement de l'amplitude de cette variation et que grâce à elle la durée du transfert de chaleur est retardée. Elle dépend de [Roulet, 2004]:

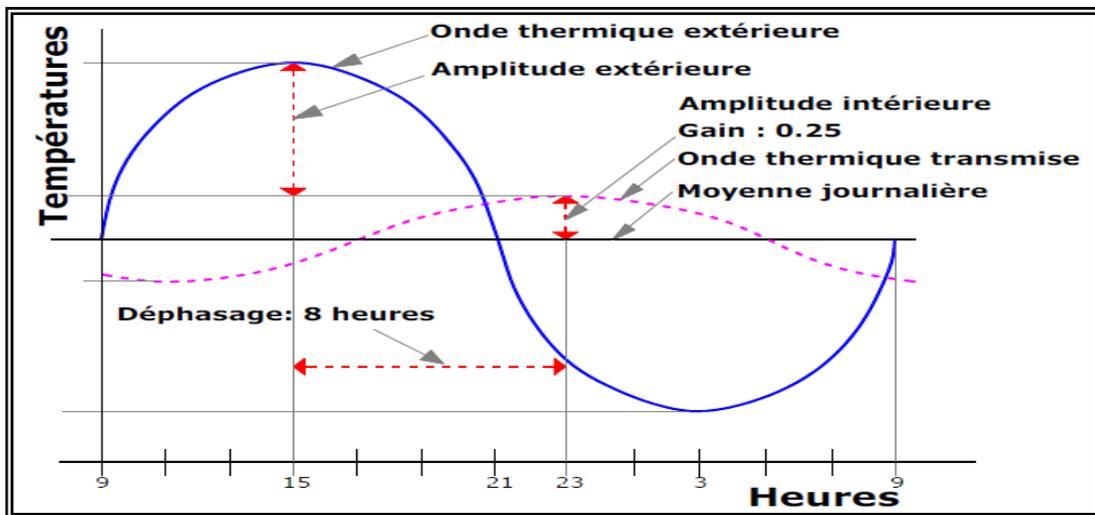
- la capacité d'accumulation de chaleur des matériaux en contact avec l'ambiance intérieure.
- les possibilités d'échanges thermiques de ces matériaux avec l'ambiance intérieure.
- l'isolation thermique du bâtiment.

Les caractéristiques mises en jeu par l'inertie thermique concernent les matériaux de construction [Roulet, 2004]:

- la conductivité thermique ;
- la chaleur spécifique ;
- masse volumique.

Ces paramètres peuvent être regroupés en deux grandeurs intermédiaires [Izard,1994]:

- **la diffusivité thermique** (a), qui correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau ( $m^2/s$ ) ( pour une faible diffusivité, l'échange d'énergie thermique entre le mur et le climat intérieur se fasse le plus lentement possible. Ceci conduit à choisir un matériau possédant une capacité thermique élevée).
- **l'effusivité thermique** (b), qui correspond à la capacité de matériaux d'absorber un flux thermique instantané ( $W/°C m^2$ ) (plus elle est grande, plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur).

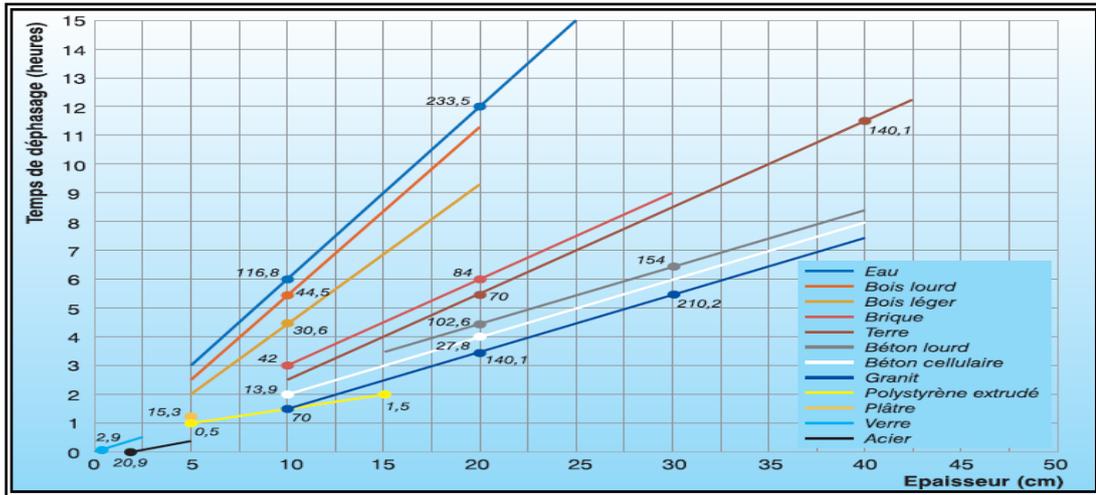


**Figure II-03 :** Le déphasage et l'amplitude de l'onde incidente par une paroi homogène  
(Source: Izard et.Guyot, 1969)

Pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en paroi homogène. L'emploi d'une paroi composite avec une faible diffusivité extérieure et une forte effusivité intérieure permet également de réduire l'amplitude d'un flux thermique [Liebard, De Herde, 2005].

De ce fait, le matériau accumulateur de chaleur devra avoir une conductivité thermique élevée pour que la chaleur puisse facilement pénétrer dans le matériau, une chaleur spécifique et masse volumique élevées pour accumuler la chaleur [Roulet, 2004].

Les matériaux de construction les plus lourds peuvent stocker des quantités de chaleur importantes et sont réputés pour avoir une inertie thermique importante. Les matériaux légers stockent peu de chaleur et sont dits à inertie thermique faible.



**Figure II-04 :** Le temps de déphasage de divers matériaux de construction en fonction de l'épaisseur et quantité de chaleur accumulée en Wh/ m<sup>2</sup>K  
(Source: Liebard, De Herde, 2005)

#### II-2-4-2-2-2- les paramètres affectant la performance de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment

L'efficacité de l'inertie thermique est déterminée par quelques paramètres et conditions. C'est important de comprendre la relation de ces paramètres et comment ils peuvent affecter la performance de l'inertie thermique. L'optimisation de l'inertie thermique dépend non seulement des conditions du climat, des propriétés thermiques du bâtiment, de la ventilation, de l'occupation et des gains de chaleur interne mais aussi de [Maldonado, 1993] :

- l'isolation de la façade, pour empêcher la pénétration des gains résultant de l'incidence des radiations solaires et de la température ambiante extérieure.
- L'usage de couleurs claires au niveau des surfaces extérieures du bâtiment et pratiquement en toiture.
- l'occultation efficace des surfaces vitrées afin d'éviter les radiations solaires directes, et en même temps qu'elle soit praticable, permettant à une quantité de radiation diffuse à éclairer l'espace intérieur le jour.
- L'orientation du vitrage au Sud et au Nord est préférable. L'Est, l'Ouest, le Sud-Est, le Sud-Ouest et orientations horizontales doivent être évitées autant que possible, pour deux raisons qu'elles reçoivent une grande quantité de radiation incidente, avec une plus grande difficulté pour leur fournir l'occultation efficace.

- l'utilisation d'une forte inertie thermique, notamment pour le toit qui joue énormément sur l'amortissement du bâtiment, mais aussi sur le déphasage.
- le scellement de l'enveloppe pour réduire l'infiltration d'air quand la température extérieure est plus élevée que celle de l'intérieur.
- prévoir des fenêtres opérables et sécurisées, assurant la ventilation lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure.

### **II-2-4-2-2-3- Exemples d'application de l'inertie thermique**

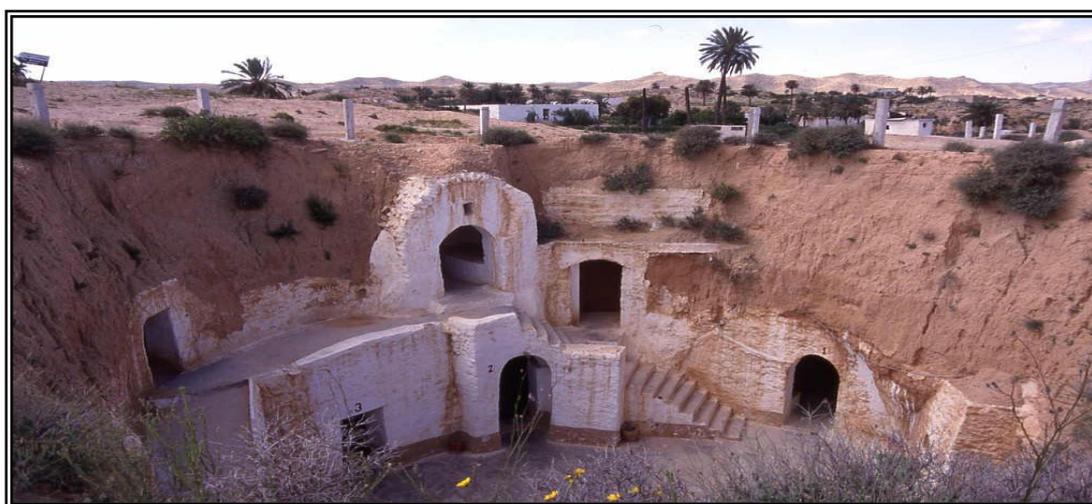
Les habitations traditionnelles possèdent des qualités architecturales usant de moyens simples mais performants, répondants positivement aux sévérités climatiques. En période caniculaire, la forte inertie des matériaux est capable d'atténuer les variations de température en stockant la chaleur excessive des journées d'été pour la restituer la nuit. L'inertie permet d'éviter les surchauffes le jour, et en créant une circulation naturelle de l'air par les ouvertures, la masse se décharge dans l'air de la nuit. En hiver ce véritable piège à soleil permet également d'emmagasiner les précieuses calories pour faire face aux jours et aux nuits froides. Ceci assure en fait une consommation énergétique réduite pour rafraîchir ou pour chauffer l'intérieur. A travers le monde, les traditions de la construction vernaculaire expriment une adaptation thermique particulièrement sophistiquée. L'architecture troglodytique, massive et l'architecture des igloos, parmi les exemples de cette construction traditionnelle savante, utilisant l'inertie thermique pour s'adapter à la rigueur du climat

#### **a) L'architecture troglodytique**

Selon Loubes en 1984 : « La recherche de l'inertie maximale d'une maison conduit à enterrer celle-ci. La masse de terre qui contribue à l'échange thermique devient immense, tend vers une grandeur infinie...Ce type d'architecture souvent très méconnu reste cependant très riche, vivant, et son aire de développement se trouve sous toutes les latitudes, tous les climats quelques soient les conditions de sols.» Constituées en rangées linéaires ou adossées ou autour d'une cour centrale, en cavités naturelles ou artificielles, les constructions enterrées ou semi enterrées offrent des ambiances intérieures très confortables. Par l'augmentation considérable de l'inertie thermique de l'enveloppe, la variation journalière des températures disparaît; seul le cycle annuel pèse sur l'ambiance intérieure. Des exemples qui ont fait l'objet d'investigation expérimentale, ont prouvé qu'une température intérieure peut être maintenue stable autour de 30°C, alors que la température de surface dans les parois extérieures dépasse les 40°C. D'autres mesures montrent que près de la surface, la température fluctue quotidiennement autour de la

température moyenne diurne. Mais avec la profondeur, la période d'intégration de la température moyenne augmente et à une certaine profondeur, l'amplitude finit par s'exercer autour de la moyenne annuelle de la température extérieure. Enfin au-delà de cette profondeur, ce sont les conditions du régime permanent qui prévalent [Izard, 1993].

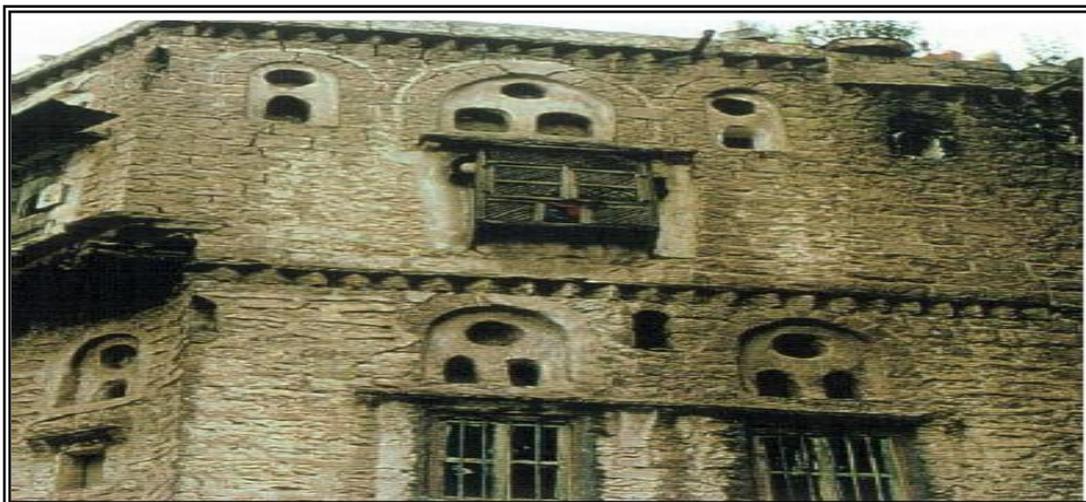
Dans ce type d'architecture on prend aussi un soin extrême pour l'orientation par rapport aux points cardinaux, au vent et au soleil. Car celui-ci combiné avec l'inertie thermique de la terre peut procurer de l'énergie et l'économie de cette dernière. Pour ces raisons, les anciennes constructions ont profité pour y installer des villes et des villages entiers souterrains. Les exemples sont nombreux Matmata en Tunisie, Tripolitanie en Libye, Aputia en Italie, Andalusia en Espagne, la ceinture du loess en Chine et les villes de Kaymakli, Derinkuyu et Ozkonak en Turquie [Medjelekh, 2006].



**Figure II-05 :** L'architecture troglodytique « Matmata » en Tunisie  
(Source : ARCHIBAT, 2005)

### **b) L'architecture massive**

Procurer la stabilité de la température à l'intérieur, entre le jour et la nuit et entre l'été et l'hiver, est un élément important dans le confort. Ceci est obtenu naturellement par l'utilisation d'éléments de structure lourds. Les maisons anciennes avec leurs murs épais assurent la fraîcheur en été et l'isolation du froid en hiver. La maison Iranienne, et celle de Yémen est parmi les exemples de cette architecture massive en climat chaud, où l'usage de matériaux locaux comme la pierre est fréquent. En climat tempéré à froid l'architecture massive est aussi présente, la pierre demeure le matériau lourd le plus fréquemment utilisé [Medjelekh, 2006].



**Figure II-06 :** Usage de matériaux locaux (la pierre) au Yémen  
(Source: Abdou, 2004)

### c) L'architecture des igloos

Une réponse aussi particulièrement ingénieuse apportée aux besoins climatiques est exprimée par l'igloo esquimau. Les Inuits, peuple de l'Est et du centre du Canada construisent des igloos pour y habiter à court et à long terme. Le froid intense impose pour la maçonnerie un matériau dont la capacité calorifique soit la plus faible possible, la neige sèche avec son inertie thermique répond admirablement à ce critère. J.M.Fitch affirme que « le dôme hémisphérique de l'igloo offre une résistance maximale et un minimum d'obstruction aux assauts du vent; dans le même temps il expose la surface la plus réduite à leurs effets refroidissants. Le dôme résume la meilleure façon de sortir le plus grand volume en mettant en œuvre la plus petite structure; cette disposition permet un chauffage maximal à partir d'une source de chaleur radiante produite par une lampe à huile ».



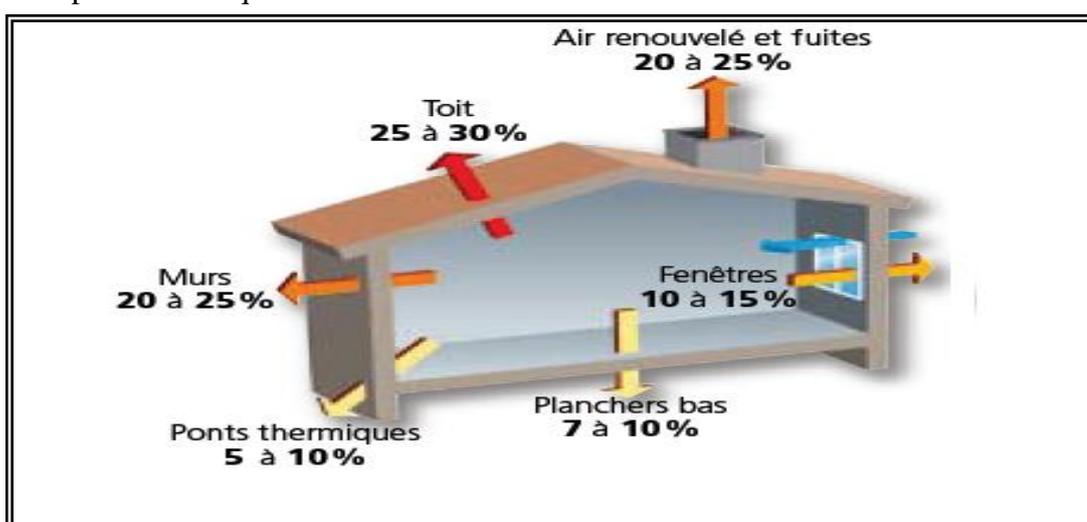
**Figure II-07 :** Architecture de l'igloo  
(Source: Researchers, Inc./George Holton In Microsoft Encarta2005)

## II-2-4-2-3- Les matériaux isolants “Isolation durable”

### II-2-4-2-3-1- Le principe de l'isolation thermique

Dans un bâtiment non isolé, les valeurs moyennes des sources de déperdition de chaleur sont les suivantes [Roulet, 2004]:

- le toit 25 à 30 % ;
- les murs 20 à 25 % ;
- le renouvellement d'air 20 à 25 % ;
- les fenêtres et portes extérieures 10 à 15 % ;
- le plancher 7 à 10 % ;
- les ponts thermiques 5 à 10 %.



**Figure II-08** : pertes thermique à travers une maison non isolée  
(Source : ADEM, 2008)

L'isolation thermique réduit les déperditions de chaleur par transmission à travers les parois des bâtiments [Roulet, 2004]. Elle peut être utilisée à la fois en construction neuve et en réhabilitation, et est souvent une technique peu coûteuse. Elle a plusieurs avantages [ADEM, 2003] :

Economie financière et d'énergie :

- Réduit la taille des systèmes de chauffage,
- Réduit les consommations d'énergie annuelles (et la pollution environnementale).

Santé, esthétique et sécurité :

- Réduit les risques de condensation et par conséquent les moisissures.

Confort thermique :

- Réduit la durée nécessaire pour chauffer une pièce,
- Contrôle la température et affecte directement ou indirectement les transferts d'humidité.

### II-2-4-2-3-2- Les isolants thermiques

Un isolant thermique du bâtiment est un matériau qui, par sa composition ou sa nature, ralentit la dissipation de l'énergie calorifique (conduit mal la chaleur). Le pouvoir isolant d'un matériau est exprimé par sa conductivité thermique. Les facteurs influençant le plus la conductivité thermique d'un matériau sont le poids volumique, la teneur en eau, la taille des pores et la nature de solide le renfermant [Liebard, De Herde, 2005]. Dans le bâtiment, l'appellation "isolant thermique" est réservée aux produits dont la résistance thermique est au moins égale à  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , et dont le rapport de l'épaisseur par sa résistance thermique (conductivité thermique) est au plus égal à  $0,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (référence à la norme NF P 75-101) [CSTB et ADEM, 2005]. Elle vise à limiter les déperditions thermiques, préserver le confort en réduisant les échanges thermiques avec l'ambiance l'extérieure [Liebard et De Herde, 2005].

La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. Les caractéristiques suivantes sont au moins aussi importantes, et peuvent être primordiales suivant les applications [Morel et Gnansounou, 2007]:

- résistance au feu,
- résistance mécanique (traction et compression),
- étanchéité à l'air,
- résistance à la diffusion de vapeur d'eau,
- faible absorption d'eau par immersion, par flottaison et par diffusion,
- stabilité dimensionnelle et comportement à la chaleur,
- qualités acoustiques,
- prix.

Dans un matériau isolant, la chaleur est donc transportée par les trois modes possibles (conduction, rayonnement et convection), le premier étant dominant. Pour des raisons pratiques, on attribue donc la totalité du transfert de chaleur au travers du matériau à la conduction, en déterminant, par la mesure, une conductivité thermique apparente du matériau [Morel et Gnansounou, 2007].

On distingue plusieurs types d'isolants, présents sur le marché sous différentes formes [Roulet, 2004]:

- matériaux minéraux : la laine de verre, la laine de roche, ...
- matériaux fibreux organiques: cellulose, chanvre, ...

- mousse organique : tel que le polystyrène (expansé ou extrudé), le polyuréthane, la mousse d'urée formaldéhyde,
- mousse inorganique : mousse de verres, vermiculite, la perlite, béton cellulaire,...
- matériaux ligneux : liège, bois léger, paille agglomérée, ....
- isolant spéciaux : sous vide, ....

L'efficacité d'un isolant est corrélée en fonction de son épaisseur et du prix. Le prix de l'isolant augmente avec son épaisseur. Par contre, le coût de l'énergie consommée pour le chauffage ou la climatisation diminue avec cette épaisseur, illustré dans le schéma ci-après [Morel et Gnansounou, 2007].

### **II-2-4-2-3-3-L'effet des ponts thermiques**

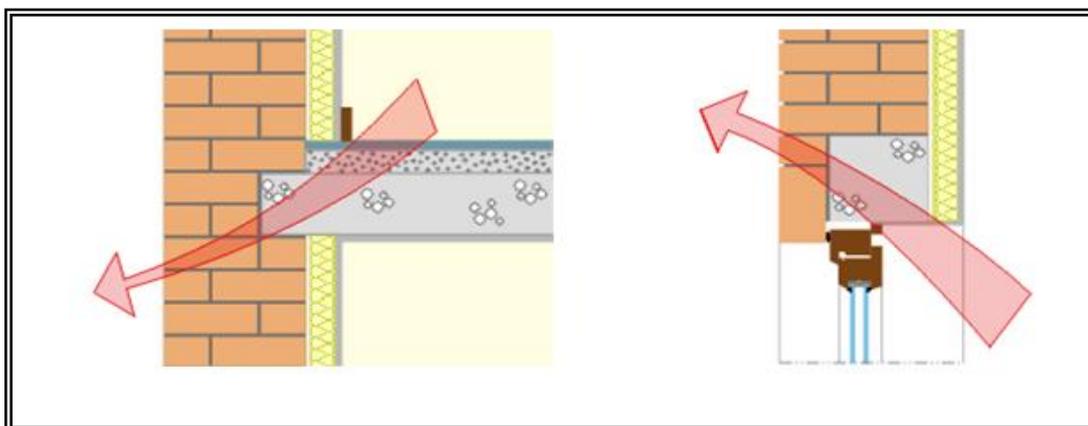
Les ponts thermiques sont des défauts dans la conception et dans la réalisation de l'enveloppe isolante qui sont responsables des problèmes d'inconfort (effet de paroi froide), de consommation supplémentaire et de dégradation éventuelle dans la construction (les moisissures, dégradation des surfaces) [Liebard, De Herde, 2005].

Un pont thermique est constitué par toute discontinuité dans la couche isolante, par tout endroit où la résistance thermique présente une faiblesse. Alternance de matériaux, modification de la structure, contact entre deux éléments provoquent souvent des ponts thermiques. Ils conduisent à des pertes de chaleur plus élevées et à des problèmes d'hygiène [Roulet, 2004].

On distingue les ponts thermiques géométriques et matériels. Les ponts thermiques géométriques tels que les angles et les coins et les ponts thermiques matériels dans lesquels le matériau conducteur traverse la couche isolante. On classe aussi les ponts thermiques linéaires qui ont une certaine longueur et ponts thermiques ponctuels dans lesquels interruption de la couche isolante reste locale [Roulet, 2004].

Il est possible de les éviter dès la phase amont du projet en utilisant les programmes de simulation. Reproduit une sortie écran d'un programme statique étudiant la répartition des températures dans un détail constructif (raccord mûr/toiture). A partir de la géométrie du détail et des conditions de température intérieure et extérieure, une matrice de calcul détermine point par point les températures dans la paroi.

L'endroit exact des points faibles dans les anciennes constructions peut être aussi localisé grâce à des techniques très développées. Il s'agit de «la thermographie à infrarouge» qui permet de visualiser en temps réel les températures de surface de l'enveloppe.



**Figure II-09** : les ponts thermiques  
(Source: [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be))

#### II-2-4-2-3-4- l'application de l'isolation

##### a) Isolation des parois opaques

L'isolation des parois opaques réduit considérablement les pertes par conduction et améliore la sensation de confort en maintenant la température de surface des parois des locaux à un niveau plus élevé. Pour conserver la qualité de l'isolation, les pénétrations d'eau et d'air doivent être évitées, en prenant soin des joints dans les constructions aux endroits des jonctions entre les parois et fenêtres, aux raccords murs et toitures [Gratia et de herde, 2006].

##### b) Isolation de parois vitrées

La performance thermique d'une paroi vitrée dépend de la nature de la menuiserie, des performances du vitrage et de la qualité de la mise en œuvre de la fenêtre. Mais la nature des fermetures (volets, persiennes) intervient également. En effet, elles peuvent réduire les déperditions, particulièrement la nuit. Enfin, les protections sont très efficaces pour limiter la température intérieure en été [Liebard, De Herde, 2005].

- **La qualité de la fenêtre** : Les fenêtres modernes sont toutes munies de garnitures d'étanchéité qui leur confèrent d'excellentes performances en termes de perméabilité à l'air et d'étanchéité à l'eau. Des solutions performantes existent en menuiseries bois, PVC, et aluminium à rupture de pont thermique.
- **La qualité du vitrage** : le vitrage présente les points faibles de l'isolation thermique du bâtiment. Le double vitrage classique (deux verres emprisonnant une lame d'air) ou le double vitrage à isolation renforcée (une fine couche transparente peu émissive, généralement à base d'argent, déposée sur une des faces du verre : côté lame d'air) sont plus performants que le simple vitrage :
  - ils réduisent l'effet de paroi froide,
  - ils diminuent les condensations et les déperditions thermiques à travers les fenêtres,

- Ils peuvent permettre des économies de chauffage et limitent les effets de surchauffe en été et améliorent fortement les conditions de confort.

### **II-2-4-2-3-5-L'emplacement de l'isolation**

#### **- L'isolation par l'intérieur:**

Cette solution consiste à utiliser l'isolant à l'intérieur de la partie porteuse ou du remplissage maçonné de la façade. Elle est moins coûteuse et mieux maîtrisée. Elle est choisie pour les cas de rénovations et de réhabilitations des bâtiments. Elle se présente sous forme de plaque de plâtre ou système de contre cloison maçonné. Parmi ses inconvénients [CERTU, 2003] :

- risque de ponts thermiques et de condensation de surface
- risque de condensation interne (par diffusion de vapeur)
- risque de condensation interne par transport de vapeur par convection
- risque de condensation en été
- risque de dégradation de la maçonnerie
- diminution de la surface habitable.
- réduit l'inertie thermique de la paroi

#### **- L'isolation par l'extérieur:**

Cette solution consiste à utiliser l'isolant à l'extérieur de la partie porteuse ou du remplissage maçonné de la façade. Elle est onéreuse. Elle se présente sous forme d'enduit sur isolant (recouvert d'un enduit armé), vêtture (comportant l'isolant et une peau manufacturée) ou bardage (l'isolant se place contre la façade en intégrant une lame d'air entre la peau extérieure et l'isolation). Cette technique permet [CERTU, 2003] :

- de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée
- d'assurer une continuité de l'isolation ou d'annuler la déperdition à travers les ponts thermiques dus à la structure de résistance des bâtiments aux liaisons (plancher – façade).
- augmente la durabilité des façades en les protégeant des variations de température et les effets de l'eau (pluie, gel, condensation).

#### **- L'isolation répartie:**

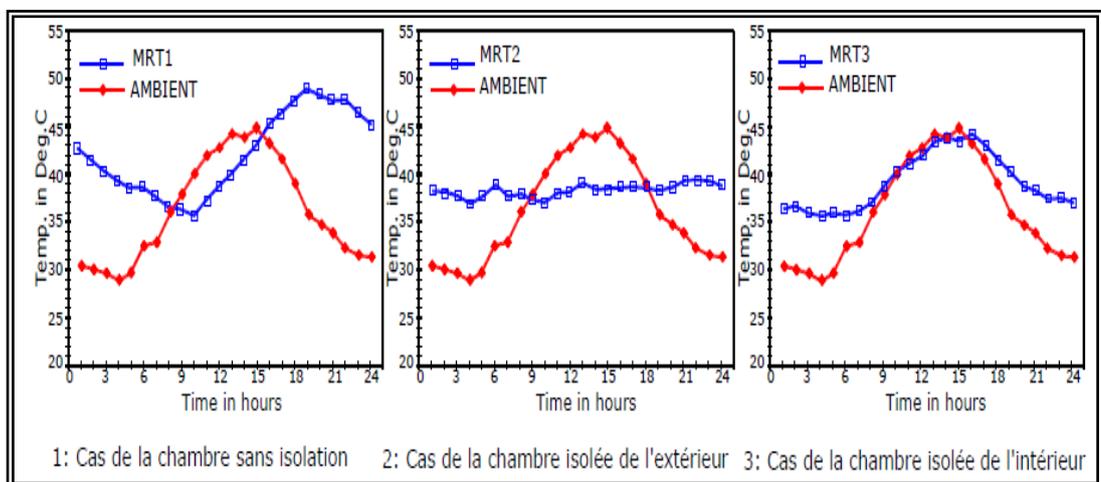
Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, donc c'est l'ensemble de la paroi qui assure l'isolation thermique (Béton, béton cellulaire, brique de chanvre, brique de terre cuite associée à un élément léger : l'isolant). L'isolation intégrée est généralement utilisée en construction neuve. Cette solution est performante et durable. Elle permet :

- d'éviter les ponts thermiques s'il est bien utilisé et correctement mis en œuvre
- de procurer une bonne inertie thermique

### II-2-4-2-3-6-L'isolation et inertie

Pour la qualité du confort, il est important de prendre en considération l'aspect "inertie thermique" de la construction dans le choix et l'emplacement de l'isolant. L'isolation par l'extérieur entraîne une forte inertie puisque la température intérieure évolue très lentement. Or l'isolation par l'intérieur fait baisser l'inertie [SHAVIV, 1984]. Cette interaction entre l'isolation et l'inertie a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs à travers le monde pour arriver à l'emplacement et l'épaisseur type de l'isolant sans affecter la performance de l'inertie thermique, tel que :

- Pour S.V Szokolay, (1980), la masse thermique du côté interne de l'enveloppe et l'isolation de son côté externe donne de bonnes performances thermiques en climat chaud et aride, puisque la masse thermique possède l'habilité d'emmagasiner la chaleur et l'isolation possède l'habilité de ralentir son transfert à l'intérieur. Les deux dispositifs permettent l'atténuation de l'amplitude d'oscillation de la température interne durant le cycle journalier.
- I.A al Mofeez,(1993) rajoute que l'application de l'isolation du côté externe de l'enveloppe permet l'augmentation du temps de déphasage. Son étude comparative est menée sur trois chambres à Elhasa en Arabie Saoudite, en changeant l'emplacement de l'isolation (une sans isolation, une deuxième avec isolation du côté externe du mur et de la toiture et une dernière avec isolation appliquée du côté interne du mur et de la toiture). Son analyse statique montre que l'application de l'isolation thermique du côté externe avec l'assurance de la ventilation nocturne, permet une faible et très stable température moyenne radiante (MRT) ).



**Figure II-10 :** Profile des températures avec ventilation de 1.7 vol/h

(Source: Al- Mofeez, 1993)

### **II-2-4-2-3-7-L'isolation et l'économie d'énergie**

L'isolation associée à l'inertie thermique dans le bâtiment entraîne des réductions considérables des charges de chauffage et de climatisation. Des études de simulation exécutées sur un bloc de logements sociaux pour 12 ensembles différents d'enveloppes et cloisons, dans le but de trouver comment les changements dans la structure affecteraient la charge de rafraîchissement annuelle et la demande maximale de rafraîchissement du bâtiment sous les conditions climatiques de Hong-Kong. Les résultats montrent que l'addition de l'isolation à l'enveloppe et les partitions serait efficace dans la réduction des charges de rafraîchissement annuelles de l'espace, jusqu'à 38%, mais non plus pourrait augmenter (jusqu'à 19%) ou réduire (jusqu'à 16%) la demande maximale de rafraîchissement selon le nombre et l'emplacement des couches d'isolation dans les murs [Bojje et Yik , 2005].

Réduire la capacité thermique de l'enveloppe et cloisons intérieures (en réduisant leur épaisseur) mènerait aux grandes augmentations dans la demande maximale du rafraîchissement avec plus de 60% dans le cas extrême [Bojje et Yik, 2005]. Il a aussi été démontré que, pour le fonctionnement intermittent du chauffage, par opposition au fonctionnement intermittent de la climatisation, la structure: isolation /maçonnerie / isolation économise de 32 à 72% plus d'énergie, comparée avec la structure: maçonnerie / isolation / maçonnerie.

### **II-2-4-3-L'architecture bioclimatique**

Esquissée par Olgay (1963) [Olgay, 1963], l'architecture bioclimatique apparaît comme principe de conception architecturale qui vise à utiliser, au moyen de l'architecture elle-même, les éléments favorables du climat en vue de la satisfaction des exigences du confort et du bien-être de l'homme. Parallèlement à cette définition, Fernandez (1996) donne l'explication suivante [Fernandez, 1996] :

« Le terme bioclimatique fait référence à une partie de l'écologie qui étudie plus particulièrement les relations entre les êtres vivants et le climat. En architecture, cette expression vise particulièrement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle, c'est-à-dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables ».

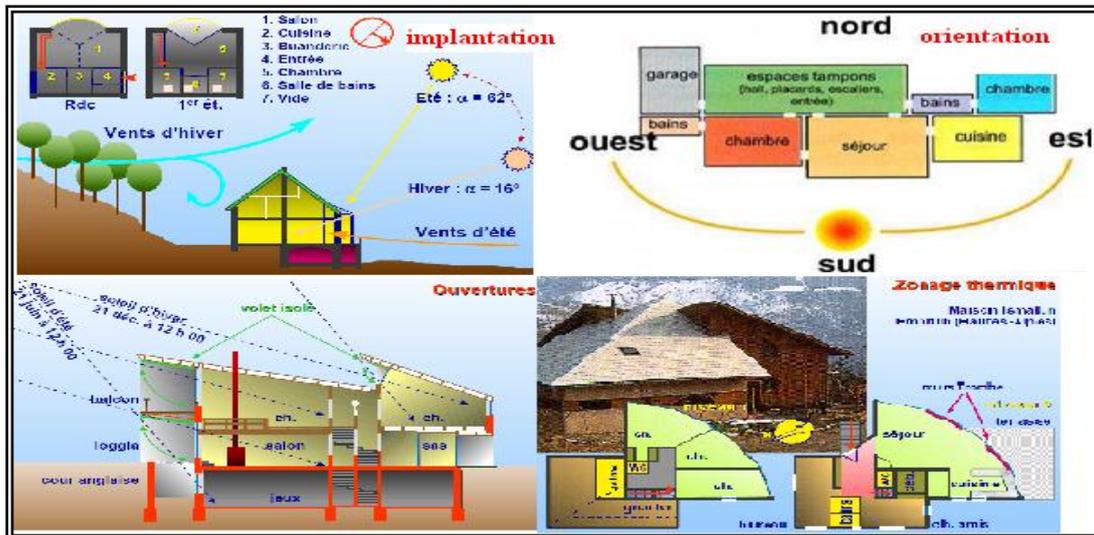
Selon De Herde (2002), l'architecture bioclimatique apparaît comme l'une des réponses pour réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre en profitant au maximum des apports bénéfiques de l'environnement et plus particulièrement du soleil comme source d'énergie inépuisable [De Herde et Liebard, 2002].

Elle fait appel à des procédés passifs et ne requiert pas de techniques particulières. Ces études nécessitent des connaissances spécifiques en physique du bâtiment que les architectes se doivent d'acquérir.

Avec l'émergence du concept de développement durable, la recherche s'est orientée vers la prise de conscience des retombées énergétiques et donc environnementales qui ont permis les investigations dans le domaine des ambiances ou l'énergie est restée un élément fondamental.

Dans ce contexte, plusieurs idées peuvent être rappelées : la considération du climat existe depuis les architectures vernaculaires. Tout au long de l'histoire de l'architecture, le climat a marqué la réflexion ayant mené à des changements importants, notamment à la période moderne. Nous résumons quelques préoccupations de l'approche climatique aux paramètres de contrôle climatique suivant [Liebard, De Herde, 2005]:

- Intégration au site ;
- Forme et orientation ;
- Ouvertures ;
- Caractéristiques thermo physiques de l'enveloppe.

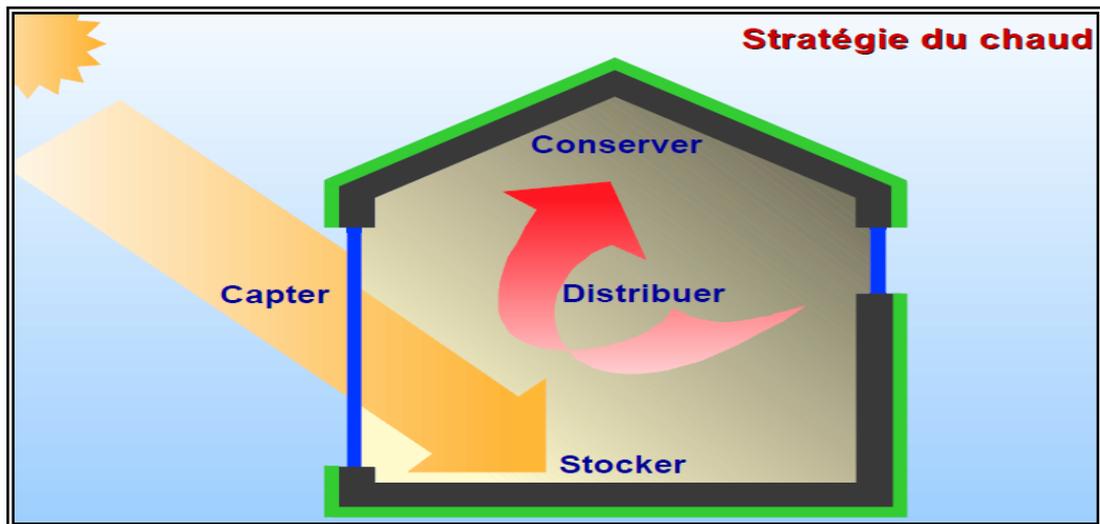


**Figure II-11** : principe de l'architecture bioclimatique  
(Source : Liebard, De Herde, 2005)

Cette approche est basée sur les connaissances des phénomènes physiques en jeu, ainsi que la prise en compte de la contrainte énergétique à travers ses manifestations (transfert d'énergie et de mass...) et par ses répercussions sur l'occupant. Il s'agit pour les constructeurs d'allier l'architecture aux potentialités du climat extérieur.

### II-2-4-3-1- stratégie de chaud

Cette stratégie répond au confort d'hiver



**Figure II-12** : principe de l'architecture bioclimatique pour le chauffage  
(Source : Liebard, De Herde, 2005)

### II-2-4-3-1-1-Le Captage

Le captage de la chaleur consiste à accueillir l'énergie solaire et la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment dépend du climat et de ses variations journalières et saisonnières, mais aussi de l'orientation du bâtiment, de la nature des surfaces et de ses matériaux. On peut distinguer deux types de gain solaire [Liebard, De Herde, 2005]:

**a) Gain direct** : implique la mise en place d'une surface importante au sud et d'une masse thermique suffisante à l'intérieur pour y absorber et stocker de la chaleur.

**b) Gain indirect et isolé** : on distingue

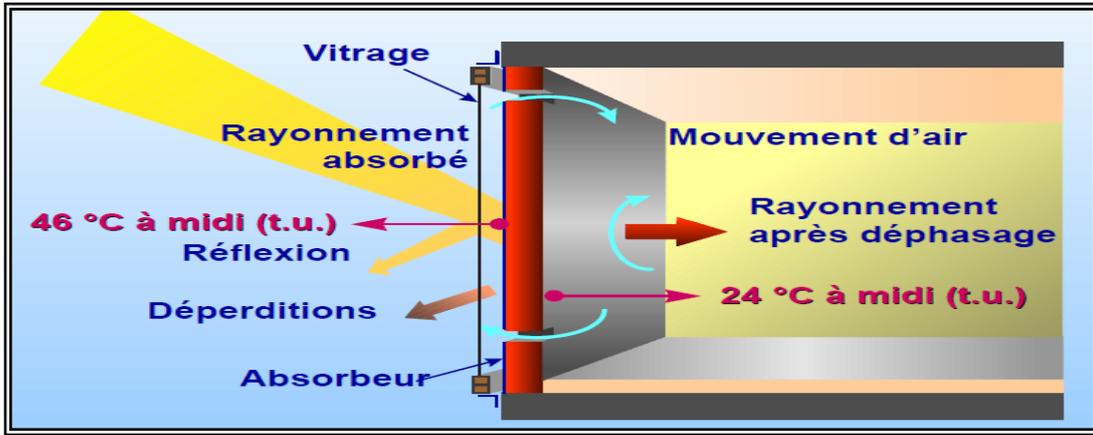
#### **b<sub>1</sub>) Mur capteur accumulateur : un mur trombe**

Développé par Félix Trombe et Jacques Michel (Odeillo), ce système combine les fonctions de captage solaire, de stockage et de restitution à l'intérieur (espace tampon) [Liebard, De Herde, 2005]. Les avantages du mur trombe sont les suivants :

- températures intérieures plus stables que dans les autres systèmes,
- les problèmes fonctionnels associés à l'ensoleillement excessif ne pénètrent pas dans l'espace habitable,
- installation pas chère.

Cependant, il présente les inconvénients suivants :

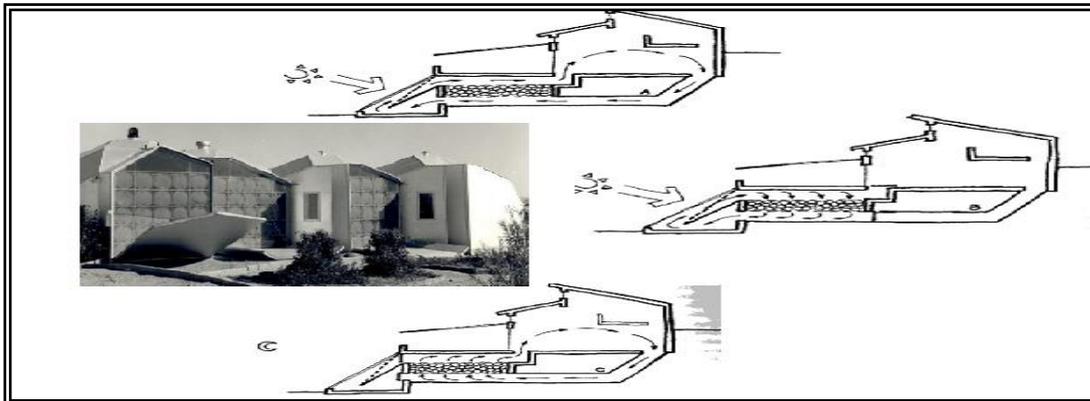
- les problèmes de surchauffe en été,
- les bâtiments à niveaux et pour faire face aux problèmes de maintenance des vitrages doivent disposer de plusieurs balcons.



**Figure II-13: Le mur trombe**  
(Source : Liebard, De Herde, 2005)

**b<sub>2</sub>) Système Steve Baer à boucles de convection**

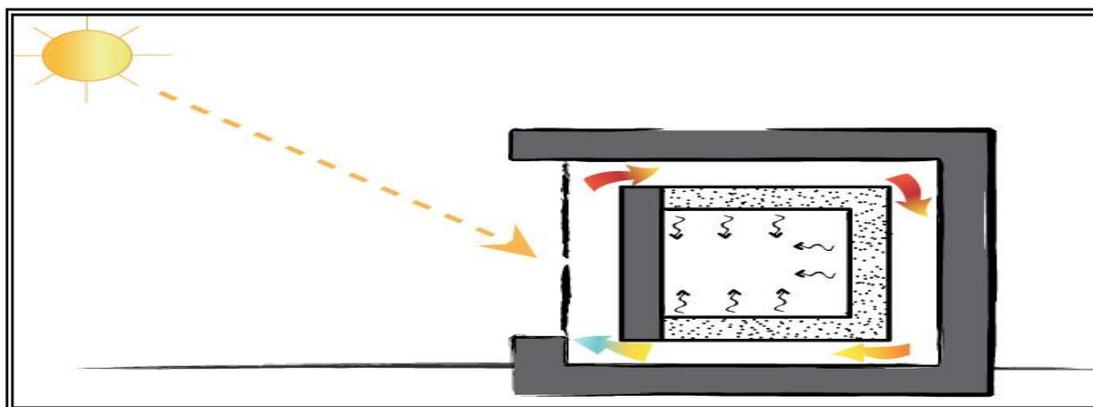
Développé par Stève Baer, ce système a été conçu pour des bâtiments ayant une seule orientation Sud. Le capteur à air et la masse de stockage sont situées au-dessous du niveau de Rez de Chaussée [Givoni., 1998].



**Figure II-14 : Système Steve Baer à boucles de convection**  
(Source : Givoni, 1998)

**b<sub>3</sub>) Système Barra Constantini**

Conçu par Horrazio barra (1987) cité par Givoni (1998) en Italie, ce système comporte un mur Sud isolé qui fonctionne comme capteur solaire à air par thermo circulation [Givoni, 1998].



**Figure II-15: Système Barra Constantini**  
(Source : Givoni, 1998)

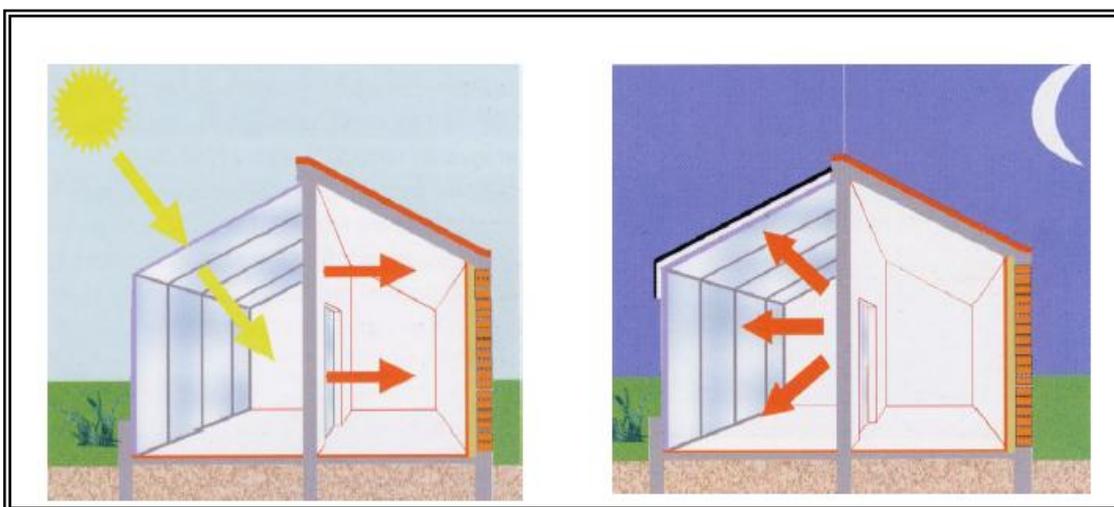
#### b4) Espace solaire

Givoni (1998) distingue deux types d'espaces solaires illustrés dans la figure [Givoni, 1998] :

- serre modifiable, possède un vitrage incliné en toiture ;
- porches solaires : toiture isolée horizontale possédant un vitrage vertical seulement.

Ces espaces peuvent être :

- attachés au mur du bâtiment
- inclus partiellement, entourés par des espaces sur les 2 ou 3 côtés
- inclus totalement : cas d'atrium.



**Figure II-16 : Espace solaire**  
(Source : De Herde et Liebard, 2002)

#### II-2-4-3-1-2-Le stockage

Le rayonnement solaire produit souvent de la chaleur au moment où elle n'est pas nécessaire. Il est alors intéressant de pouvoir stocker cette énergie jusqu'au moment où ce besoin se fait sentir. Ce stockage a lieu au sein de chaque matériau suivant sa capacité d'accumulation et permet ainsi d'absorber la chaleur et d'atténuer les fluctuations de température dans le bâtiment en tirant parti de son inertie [Liebard et De Herde, 2005].

#### II-2-4-3-1-3-La Conservation

C'est une forme d'étanchéité de l'enveloppe ainsi que les vertus isolantes de ses parois qui limiteront les déperditions thermiques du bâtiment. Cloisonner les espaces en différentes zones permet de créer des ambiances thermiques différenciées (orientées suivant leur utilisation) [Liebard, De Herde, 2005].

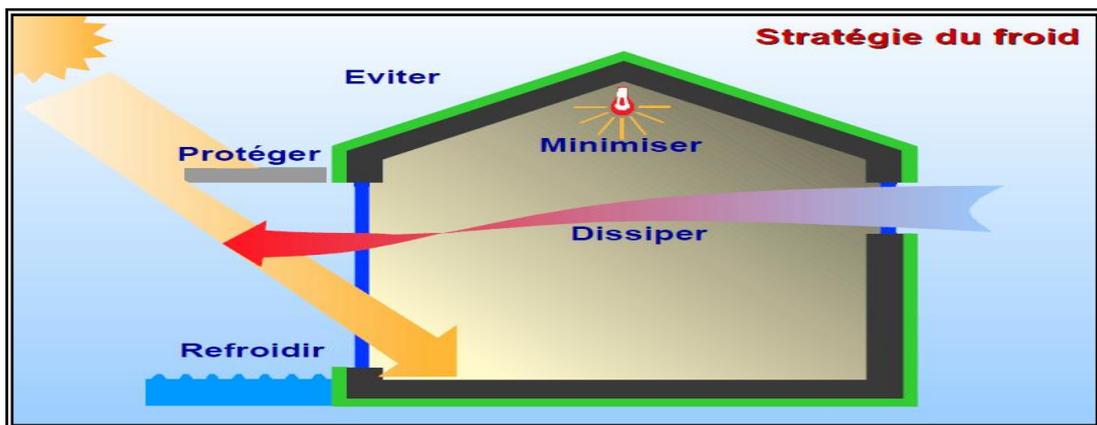
#### II-2-4-3-1-4-La Distribution

La distribution de la chaleur dans le bâtiment consiste à la conduire dans les différents lieux de vie où elle est souhaitable. Cette distribution peut s'effectuer naturellement lorsque la

chaleur accumulée dans les matériaux durant la période d'ensoleillement est restituée à l'air ambiant par rayonnement et convection. Un autre mode de distribution de chaleur est celui de la thermo circulation de l'air (migration naturelle des masses d'air chaud vers le haut). Enfin, cette distribution peut être assurée par un circuit de ventilation forcée. La chaleur doit également être régulée en fonction des différents espaces et de leur utilisation [Liebard et De Herde, 2005].

### II-2-4-3-2- stratégie de froid

La stratégie de refroidissement naturel répond au confort d'été. Il s'agit de se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, de minimiser les apports internes, de dissiper la chaleur en excès et enfin de refroidir naturellement.



**Figure II-17** : principe de l'architecture bioclimatique pour le rafraîchissement (Source : Liebard, De Herde, 2005)

### II-2-4-3-1-2- 1-Limiter les apports thermiques solaires

L'apport thermique solaire est essentiellement constitué par les apports solaires directs ou indirects.



**Figure II-18** : Types de protections solaires (Source : Liebard et de Herde, 2005)

Liebard et de Herde (2005) définissent la protection solaire : « tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas avoir ensoleillée », dont le but est :

- réduire les surchauffes dues aux rayonnements solaires,
- améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres, et
- contrôler l'éblouissement.

Protéger le bâtiment et particulièrement ses ouvertures de l'ensoleillement direct afin de limiter les gains directs revient à ériger des écrans extérieurs si possibles, qui le mettent à l'ombre. Ces écrans peuvent être fixes ou mobiles, intérieurs ou extérieurs, horizontaux ou verticaux, saisonniers (végétation). Ces éléments doivent procurer une bonne protection solaire durant la saison chaude, ils ne doivent pas limiter les gains solaires en hiver ni réduire l'éclairage ou la ventilation naturelle.

### **a) Les protections solaires fixes**

Les dispositifs de protection solaire fixes sont des éléments architecturaux majeurs et ils permettent d'articuler les façades des bâtiments. On distingue :

#### **- La protection des parois horizontales**

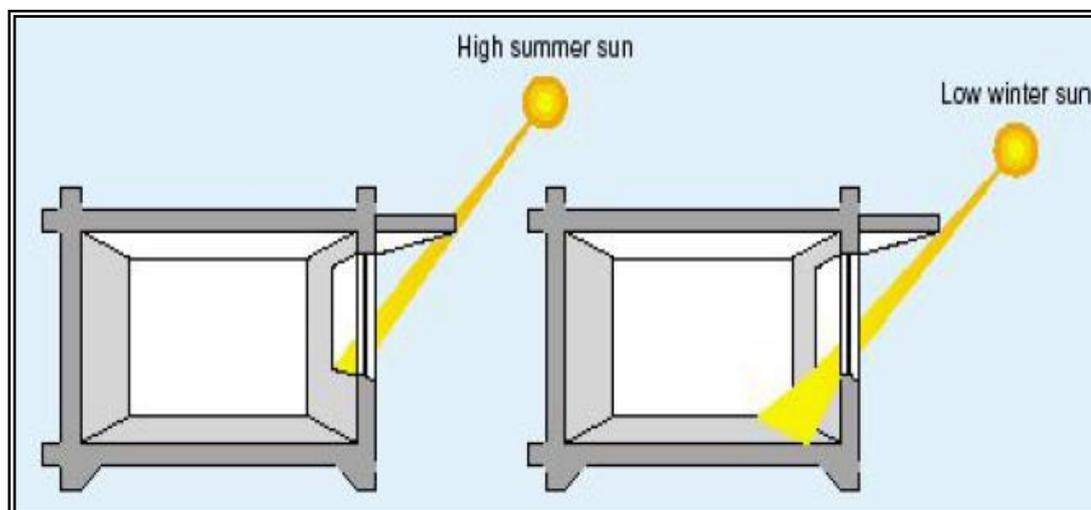
Les parois horizontales sont celles qui reçoivent, en été, plus d'énergie solaire. Leurs protections sont souvent une nécessité. L'architecture vernaculaire et classique avait donné une réponse sous forme de combles, sorte d'espace tampon, l'apparition des toitures terrasses a fait émerger le problème. La solution la plus efficace pour la protection des toitures est l'ombrage par un élément type parasol qui a fait objet d'inspiration par plusieurs architectes (Le Corbusier, José Luis Sert, ..), qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface externe. De plus, l'espace créé entre la dalle et le toit parasol est propice à la génération d'une ventilation naturelle capable de compenser les effets des flux radiatifs émis par le parasol [Izard, 1994].

#### **- La protection des parois verticales**

La typologie des éléments permettant de protéger des parois verticales est beaucoup plus riche. Le problème ici réside plutôt dans l'efficacité de ces systèmes qui dépendent d'un plus grand nombre de paramètres tels que : l'orientation, la latitude et la dimension. On distingue : les auvents (moucharabieh) , casquette (toit dépassant), brise soleil horizontal, les

flancs (décrochement de façade, saillie de refonds, patio, les percements, loggia : espace intermédiaire, ..[Izard, 1994].

Les dispositifs de protection solaire fixes sont efficaces contre le soleil d'été, mais laissent passer le soleil d'hiver à incidence faible. Ils peuvent aussi réduire la luminance intérieure par ciel couvert. Ils permettent un contrôle minimal de la lumière diffuse ou réfléchi.



**Figure II-19:** Protections solaires fixes  
(Source :Tareb, 2005)

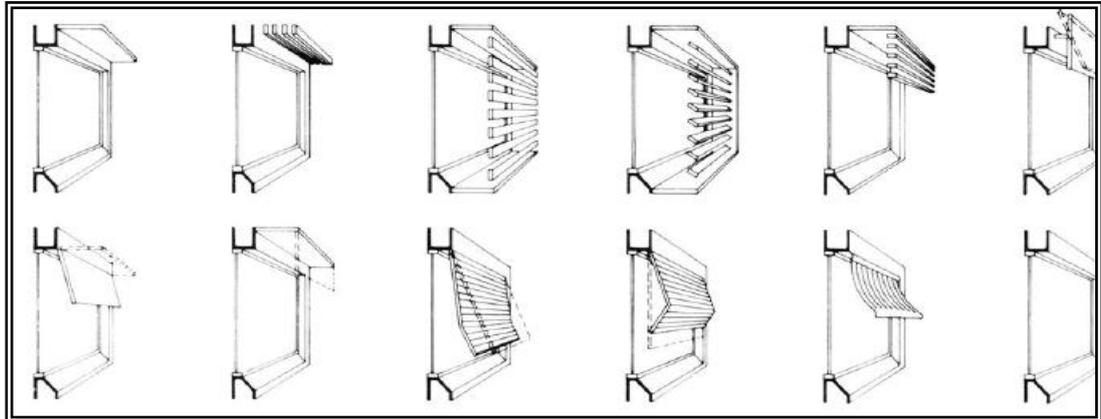
### **b) Les protections solaires mobiles**

Les dispositifs de protection solaire ajustables ou mobiles peuvent être situés à l'extérieur, à l'intérieur, ou entre les vitres d'un double ou triple vitrage. Les systèmes ajustables sont le plus souvent utilisés à l'intérieur, où les manipulations sont les plus faciles et ils sont peu onéreux. Cependant, on peut rencontrer de tels dispositifs placés à l'extérieur dans certains cas. Ces protections regroupent les voilages, les rideaux, les stores, les persiennes, les volets,...

Trois cas peuvent se présenter [Izard, 1994]:

- fermetures placées côté intérieur du vitrage (voilage, stores intérieurs, rideaux) : l'effet de serre » est alors possible, surtout si la surface externe est absorbante, dans ce cas la chaleur est générée à l'intérieur du bâtiment.
- fermetures placées côté extérieur du vitrage (store, volet roulant, persiennes) : l'efficacité est maximale, surtout si le rayonnement intercepté est réfléchi. Dans ce cas, non seulement le vitrage n'est pas soumis au rayonnement solaire, mais les effets d'échauffement sur la surface de la fermeture sont réduits.

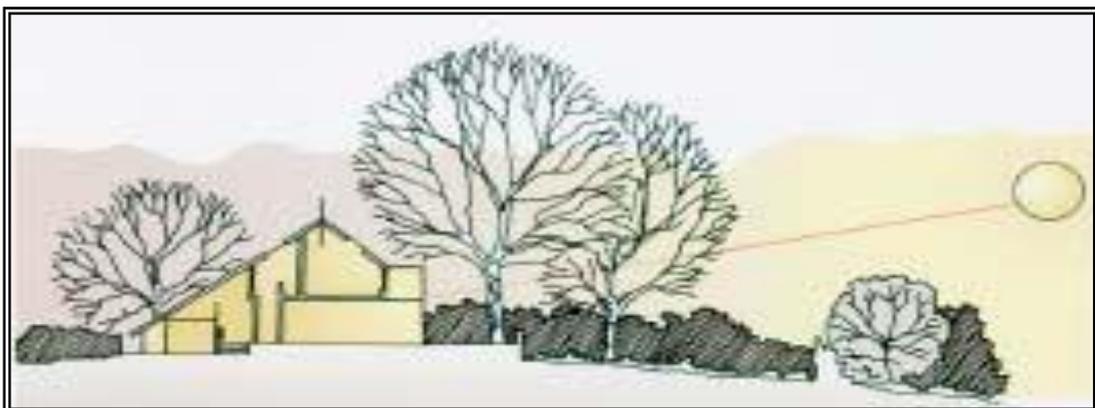
- les dispositifs de protection solaire intégrés au vitrage, peuvent accroître la protection solaire quand ils sont utilisés avec d'autres dispositifs. Des films appliqués sur les vitres (vitrage traité : vitrage sélectif, vitrage réfléchissant, sont utilisables pour la réhabilitation).



**Figure II-20** : Protections solaires mobiles  
(Source :Tareb, 2005)

### c) Les protections solaires saisonnières

Les plantations peuvent protéger non seulement les ouvertures, mais aussi les murs extérieurs et les toits en réduisant les transferts conductifs et les gains par rayonnement, en utilisant des arbres à feuilles caduques, la protection solaire existe uniquement quand cela est nécessaire, c'est à dire en été. L'utilisation d'espèces à feuilles persistantes permettra au contraire une protection tout au long de l'année. La végétation peut aussi être utilisée pour réduire les réflexions du sol et aussi la température d'air grâce au phénomène d'évapotranspiration des végétaux. Les espèces à feuilles persistantes peuvent aussi être utilisées pour réduire les réflexions dues aux routes, aux zones pavées et aux bâtiments environnants. Elles peuvent aussi être utilisées efficacement comme protection contre le vent [Tareb, 2005].



**Figure II-21** : Protections solaires saisonnières  
(Source :Tareb, 2005)

### II-2-4-3-1-2- 2-Minimiser les apports internes

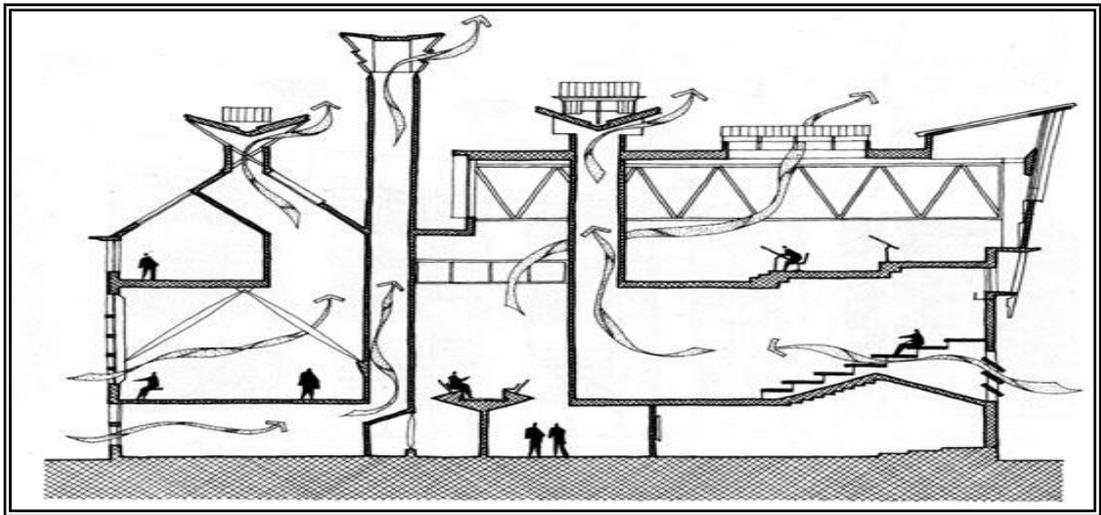
Minimiser les apports internes vise à éviter une surchauffe des locaux due aux occupants et aux équipements : éclairage artificiel, l'équipement électrique, la densité d'occupation des locaux, certains apports peuvent être facilement minimisés en favorisant par exemple l'éclairage naturel [Liebard et de Herde, 2005].

### II-2-4-3-1-2- 3-Dissiper les surchauffes

La dissipation des surchauffes peut être réalisée grâce à la ventilation naturelle, en exploitant les gradients de température par le biais d'exutoires produisant un effet de cheminée. La pression du vent et la canalisation des flux d'air peuvent également être mises à profit pour évacuer l'air surchauffé du bâtiment [Santamouris, 2005].

Il existe deux phénomènes qui provoquent la ventilation naturelle :

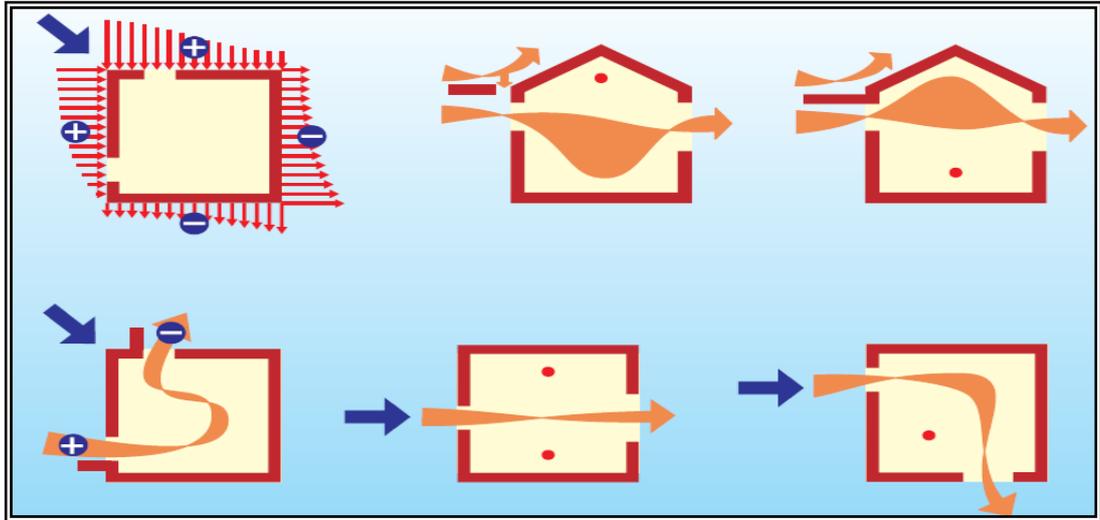
- **L'effet thermosiphon (effet cheminé) ou ventilation ascendante** : qui crée une charge motrice par différence de température entre deux parties d'une boucle, cette dernière entraînant un écoulement tel que cette charge est perdue par perte de charge ainsi, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'édifice crée une charge motrice [Chatelet et al, 1998]. Dès la conception, il est primordial de minimiser les cloisons pouvant entraver l'écoulement du vent [Liebard et de Herde, 2005].



**Figure II-22:** ventilation naturelle par effet thermosiphon  
(Source : Bourgeois et al, 2004)

- **L'effet du vent ou ventilation traversante** : provoque autour des édifices des différences de pression dues aux édifices eux même ou aussi aux obstacles voisins créant ainsi des dépressions ou suppressions devant ou derrière celles-ci. L'écoulement a lieu de la pression la plus haute vers la pression la plus basse [Chatelet et al, 1998].

L'efficacité de cette ventilation tien compte de l'implantation perpendiculaire aux vents ainsi que l'organisation traversante des éléments [Liebard et de Herde, 2005].



**Figure II-23** : ventilation naturelle par effet du vent  
(Source : Liebard et de Herde, 2005)

#### II-2-4-3-1-2- 4-Refroidir les locaux

Le refroidissement des locaux peut facilement être assuré par des moyens naturels : les techniques de rafraîchissement passif, on peut citer :

- **le rafraîchissement nocturne (ventilation nocturne)**

Le rafraîchissement par ventilation nocturne est une technique bien établie qui permet à la ventilation naturelle de s'effectuer la nuit, avec l'intention d'éliminer les gains de chaleur internes accumulés pendant le jour. En permettant à l'air plus frais de la nuit de circuler à travers le bâtiment, la chaleur est évacuée et on réalise un refroidissement général des structures, du mobilier et autre composant provoquant un effet de rafraîchissement le jour suivant [Izard, 1994].

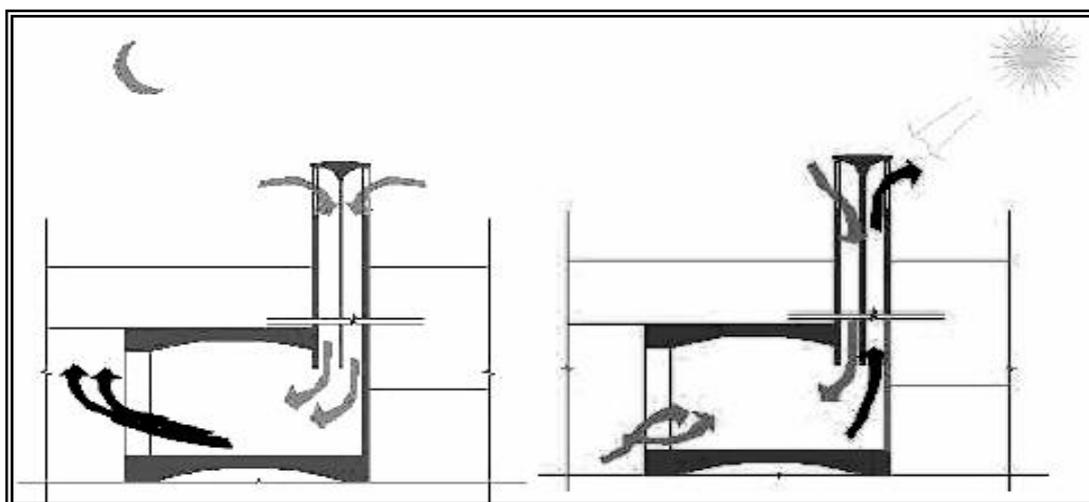
- **Le rafraîchissement par rayonnement (rafraîchissement radiatif : cour, patio)**

Toute surface émet un rayonnement de grandes longueurs d'onde vers la voûte céleste. Le flux émis est proportionnel à la différence de température entre la surface et le ciel. Ce processus est gênant en hiver parce qu'amplifiant les déperditions, comme il puisse être judicieusement exploité en été [Izard, 1994].

- **Le refroidissement par humidification adiabatique de l'air (tour à vent, ...)**

Système répandue dans les climats secs, dont l'air sec cède de sa chaleur sensible en se refroidissant (diminution de la température) mais se charge en humidité. L'enthalpie de

vaporisation de l'eau est puisée dans l'air, l'enthalpie de l'air reste constante (en se déplaçant sur une courbe isenthalpique dans le diagramme psychrométrique). On obtient alors un air humide, mais plus frais. L'architecture vernaculaire offre des exemples de systèmes d'humidification de l'air. C'est le cas notamment des tours à vent Iranien (malqaf), les maziaras d'Egypte, les fontaines des patios, [Izard, 1994].



**Figure II-24:** Tour à vent pour refroidissement passif dans l'architecture Iranienne (Source : Ghaemmaghami et Mahmoudi, 2005)

- **Le rafraîchissement en utilisant l'inertie thermique du sol**, le geocooling (sonde géothermique, puits provençal) : qui sera développé dans les chapitres qui suivent.

## **II-3- Le concept de performance énergétique du bâtiment cœur de la stratégie de maîtrise d'énergie**

### **II-3-1-Définition du concept**

Un concept de bâtiment performant est défini par un ensemble d'objectifs et de solutions techniques destinés à guider le concepteur. Ce dernier, en s'appuyant sur divers outils d'aide à la conception, associe des techniques, matériaux, structures et équipements de manière à atteindre au mieux les objectifs fixés. Enfin, après la mise en service du bâtiment, une phase d'évaluation permet au concepteur et au maître d'ouvrage de quantifier les performances réelles du bâtiment et de les comparer aux objectifs originaux [Thiers, 2008].

### **II-3-2-Typologie des bâtiments performants**

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs

dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment.

Pourtant le concept sous-jacent ne se résume pas à cette simple caractéristique ; ces dénominations sont nécessairement réductrices. Une typologie des dénominations rencontrées dans la littérature a été réalisée, de manière à faire ressortir les principales caractéristiques de ces bâtiments et les principaux concepts associés. Deux types d'approche se distinguent: l'approche purement énergétique et l'approche plus large.

### a) Concepts purement énergétiques

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments (réglementation thermique 2005 [JORF, 2006] en France, réglementation Energieeinsparverordnung [EnEV, 2004] en Allemagne) où sont simplement associées à des labels (Minergie en Suisse [Minergie 2008], Passivhaus en Allemagne [Passivhaus 2008], CasaClima / Klimahaus en Italie [Klimahaus, 2008]). En France, la réglementation propose cinq labels (HPE, THPE, HPE EnR, THPE EnR et BBC 2005), soit plusieurs niveaux de performance différents, et incite à l'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment [JORF, 2007].

Pour ces approches, les critères évalués sont peu nombreux, bien définis et quantifiables ce qui facilite l'identification des concepts sous-jacents. Ceux qui ont été identifiés sont les suivants :

**-Le bâtiment à basse consommation** ou « basse énergie » (en anglais : low energy house) se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standard. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend a priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure [Thiers, 2008].

**- Le bâtiment « passif »** (en allemand : Passivhaus, en anglais : passive house)

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit

système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation. [Thiers, 2008].

**- Le bâtiment « producteur d'énergie »** (en anglais : near zero energy house)

Il est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept du bâtiment à proprement parler. L'expression "bâtiment producteur d'énergie" est néanmoins parfois employée pour désigner un « bâtiment à énergie positive ». [Thiers, 2008].

**- Le bâtiment « zéro énergie »** ou « zéro net » (en anglais : net zero energy house)

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul [Bernier, 2006].

**- Le bâtiment « à énergie positive »** (en allemand : Plusenergiehaus)

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau « zéro énergie »: il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique [Disch, 2008 ; Maugard et al. 2005].

**- Le bâtiment autonome :** un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux. [Thiers, 2008].

### **b) Concepts plus larges**

Certains concepts découlent d'approches globales qui prennent en compte un grand nombre d'interactions du bâtiment avec son environnement, la question énergétique ne formant qu'une partie de ces interactions. C'est le cas des méthodes CASBEE (Japon) [CASBEE, 2008], LEED (Etats-Unis d'Amérique) [USGBC, 2008] et BREEAM (Royaume-Uni) [BREEAM, 2008] qui visent une labélisation ou une certification, mais aussi de la norme R-2000 au Canada, qui est associée à une réglementation [R2000, 2005]. En France, la démarche HQE® (Haute

Qualité Environnementale), proposée aux maîtres d'ouvrage, ne fixe aucun objectif de performance [AssoHQE, 2006]. Des organismes certificateurs proposent des référentiels.

Ces différentes approches globales visent à apprécier la « qualité environnementale » du bâtiment. Cependant, les critères de performances environnementales considérés sont nombreux et variables selon les approches, parfois subjectifs, et donc sujets à débat et controverses. D'autres concepts sont basés sur une approche économique. Les principaux concepts identifiés sont les suivants :

- « **zero utility cost house** », « net zero annual energy bill » ou « zero energy affordable housing », ces expressions plutôt évoquées au Japon ou aux Etats-Unis d'Amérique, désignent des bâtiments dont la facture énergétique est nulle : la vente d'une partie de la production énergétique du bâtiment compense les frais engendrés par l'achat de l'énergie consommée (électricité, hydrocarbures etc.). Cette approche est privilégiée dans l'habitat social pour lequel la facture énergétique représente une part importante du budget des occupants. L'objectif est atteint grâce à la réduction des consommations et à l'usage des ressources énergétiques renouvelables gratuites. Mais le bilan dépend de facteurs non physiques tels que les prix des énergies ou les offres commerciales des fournisseurs. [Thiers, 2008].

- « **maison neutre en carbone** », « maison zéro carbone » ou « bâtiment à émission zéro » (en anglais : carbon neutral house ou low carbon house). Ces expressions désignent un bâtiment dont le fonctionnement n'induit aucune émission de CO<sub>2</sub>. Cette orientation, qui s'inscrit dans la démarche du protocole de Kyoto, vise à réduire la participation du bâtiment à l'accroissement de l'effet de serre. La démarche "zéro carbone" est généralement associée à un mode de vie, dont la portée, au-delà du bâtiment, englobe les modes de déplacements, voire les modes de consommation des occupants du bâtiment. L'une des conséquences de cette démarche est l'utilisation exclusive de ressources énergétiques renouvelables. Le projet BedZed, en Angleterre, a été réalisé selon ce principe [BedZed, 2008].

- Le **bâtiment « vert »**, « **durable** », « **soutenable** » ou « **écologique** » (en anglais : green building), ces qualificatifs font référence à des notions surtout symboliques dont les concepts associés sont mal définis. Ils dépassent très largement le cadre énergétique et soulignent plutôt le faible impact **environnemental** du bâtiment, par exemple par les matériaux mis en oeuvre. L'une des multiples facettes de tels bâtiments peut éventuellement correspondre à l'un des concepts présentés plus haut. [Thiers, 2008].

- Le **bâtiment « intelligent »** (en anglais : intelligent building), cette expression désigne un bâtiment qui présente une forme « d'intelligence », généralement apportée par des automates programmables et des systèmes informatiques de supervision. Ces équipements visent à

améliorer la gestion de certaines fonctions modulables du bâtiment, telles que la protection solaire, la ventilation, le chauffage, l'éclairage ou la sécurisation des accès. Il existe une multitude de définitions de ce concept [Wong et al. 2005], cependant l'objectif essentiel du bâtiment intelligent semble être **l'amélioration du confort et de la productivité des occupants** à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent les préoccupations énergétiques et environnementales peuvent y être secondaires, voire absentes. [Thiers, 2008].

## **II-4- les enjeux de développement durable pour l'énergie En Algérie**

### **II-4-1- Le cadre législative**

En 1986, l'Algérie, pays exportateur de pétrole et de gaz naturel, subit de plein fouet le contrechoc pétrolier : les prix du pétrole baissent et provoquent une diminution des rentrées de devises pour le financement de l'activité économique. [Iddri , 2008].

Dans ce contexte, le pays prend conscience de la nécessité de définir une politique d'efficacité énergétique. La politique énergétique algérienne repose aujourd'hui sur quatre instrument [Iddri , 2008].

- une agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) créé en 1987<sup>1</sup>
- cadre réglementaire assuré par la loi de 09-99 ;
- un fonds national pour la maîtrise de l'énergie ; et
- des mesures d'incitations et d'accompagnement.

Cette politique s'appuie sur un ensemble d'organismes et d'entreprises économiques prenant, chacun en ce qui le concerne, le développement des énergies renouvelables. Trois organismes, relevant du secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique sont en activité depuis 1998 :

- Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER),
- Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES),
- Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS).

Le programme national pour la maîtrise de l'énergie (PNME, 2004-2011), élaboré par l'APRUE constitue le cadre d'exercice de la politique Algérienne d'efficacité énergétique puisqu'il définit ses objectifs et les moyens de sa mise en oeuvre sur la base d'études de

---

<sup>1</sup> le décret n° 85-235 du 25 août 1985, modifié et complété, portant création d'une agence pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie

prospectives énergétiques et de données socioéconomiques. Le programme se décline sous forme d'un plan d'action qui s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation, notamment celui du bâtiment. Pour la période 2007-2011, le plan d'action relatif au secteur du bâtiment résidentiel prévoit les actions exposées dans le tableau ci-dessous [Iddri, 2008].

Axe d'intervention	Taux d'aide (%)	Apport FNME (MDA)	Investissements générés (MDA)	Valorisation à l'export(MDA)	Economie d'énergie (TEP)	Tonnes CO2 évitées
Eclairage performant	100	526	526	1453.4	55900	1677000
Froid performant	80	80	100	156.5	6020	18060
Eau chaude solaire	45	20	44	26.83	1032	3095
Logement HPE	80	100	126	134.1	51600	15480
Rénovation thermique	80	16	20	21.24	817	2451
Total		742	816	1792	68929	206786

**Tableau n° II-01** : plan d'action relatif au secteur du bâtiment résidentiel

(Source : Iddri, 2008)

Sur le plan législatif et réglementaire, l'Algérie dispose un arsenal juridique important en matière de maîtrise d'énergie :

- la loi 09-99 du 28 Juillet 1999, relative à la maîtrise d'énergie [JORA,1999]<sup>2</sup>
- La loi 04-09 du 14 Août 2004 relatives à la promotion des énergies renouvelable dans le cadre de développement durable. [JORA,2004]<sup>3</sup>
- Le décret exécutif 04-149 du 19 Mai 2004 fixant les modalités d'élaboration du programme national de maîtrise de l'énergie. [JORA, 2004a]<sup>4</sup>.
- Arrêté interministériel du 29 novembre 2008 définissant la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique. [JORA, 2009]<sup>5</sup>

<sup>2</sup> JORA, 1999 : Journal officiel de la république Algérienne n° 51 du 02/08/1999

<sup>3</sup> JORA, 2004 : journal officiel de la république Algérienne n° 52 du 18/08/2004

<sup>4</sup> JORA, 2004 : journal officiel de la république Algérienne n° 32 du 23/05/2004

- Arrêté interministériel du 29 novembre 2008 définissant la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique.

**a) La loi 99-09 du 28 Juillet 1999, relative à la maîtrise de l'énergie**

Elle définit les contours d'une nouvelle politique énergétique nationale dont le model de consommation repose sur les options énergétique suivantes [ Iddri , 2008]. :

- Utilisation prioritaire et maximale de gaz naturel ;
- Développement de l'utilisation des GPL ;
- Orientation de l'électricité vers des usages spécifiques ;
- Proportion des énergies renouvelable ;
- Economie d'énergie au niveau de sa transformation et de son utilisation.

Son contenu bien que global, fixe de nombreux aspects liés à la maîtrise de l'énergie dans le domaine de la construction, de l'industrie et des transports tels que les normes d'efficacité, les dispositions de contrôle et de suivi, les modalités de financement les mesures incitatives ainsi que les moyens de sensibilisation et d'éducation.

La réglementation spécifique relatif à la thermique du bâtiment notamment celle promulguée en 2000 (décret exécutif 2000-90 adopté en avril 2000 portant sur la réglementation thermique des bâtiments neufs)<sup>6</sup> trouve dans cette loi l'ancrage juridique nécessaire à sa mise en oeuvre. En effet, la conformité aux normes techniques relatives à la construction se rapportant à la résistance thermique, à l'étanchéité des ouvertures de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment, à la qualité des matériaux d'isolation et à leur mode d'installation, à la fenestration, aux dispositifs des systèmes de chauffage ou de climatisation est maintenant exigée.

Les multiples efforts de l'Algérie pour établir une réglementation thermique, débuté en fin de 1991 par sa participation au projet « R.T du Maghreb » avec la Tunisie et le Maroc. Ce projet est assisté par des experts de la C.C.E et soutenu financièrement par la commission européenne (DG XVII) [ARCHIBA, 2004]. Il vise à élaborer une réglementation thermique basée sur un seuil de confort minimal, assuré naturellement sans le recours à la consommation énergétique. Aujourd'hui, la règlementation Algérienne s'est enrichie de documents techniques réglementaires (DTRC 3-2 du 10/12/1997 et DTRC 3-4 du 18/08/1998 et DTRC3-3-1 du 14/11/2005. initié par le ministère de l'habitat dont le maître d'œuvre est le centre national des

---

<sup>5</sup> JORA, 2009 :journal officiel de la république Algérienne n° 12du 12/02/2009.

<sup>6</sup> Journal officiel n° 25 du 30/04/2000

études et recherches intégrée dans le bâtiment (CNERIB)<sup>7</sup>. ces documents fixent les méthodes de calcul des déperditions dans les conditions d'hiver et des apports dans les conditions d'été respectivement. Ils mentionnent d'autre part, les exigences réglementaires que doivent satisfaire les enveloppes des bâtiments. Ces DTR permettent aux maîtres d'ouvrage et entreprises de réaliser et concevoir des ouvrages énergétiquement efficaces, tout en assurant les exigences requises en matière de confort et permet de réduire en principe de 30 à 40% la consommation d'énergie hors poste de cuisson, ce qui contribuerait à réduire fortement les émissions de GES [MHU, 2008].

**b) La loi 04-09 du 14 Août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre de développement durable**

Dans le cadre de cette loi, la promotion des énergies renouvelables y est inscrite comme l'un des outils de la maîtrise de l'énergie à travers les économies d'énergies conventionnelle qu'elle permet de réaliser.

Ainsi que, un Fond National de Maîtrise de l'Energie (FNME) a été institué. Il finance les projets de maîtrise de l'énergie. Des actions touchant les énergies renouvelables sont prévues pour être financées dans ce cadre au titre du plan National de Maîtrise de l'Energie (PNME) 2006-2010. Il s'agit d'opérations touchant les secteurs résidentiel et tertiaire.

**c) Arrêté du 21 février 2009 relatif à l'étiquetage énergétique des réfrigérateurs, des congélateurs et des appareils combinés à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique**

le présent arrêté a pour objet de mettre en application les modalités d'étiquetage des réfrigérateurs, des congélateurs et des appareils combinés à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et alimentés exclusivement par le réseau de distribution d'énergie électrique basse tension, ainsi que les conditions de leur mise en vente sur le marché. Il détermine également les catégories et établit le modèle de l'étiquette ainsi que la documentation technique y afférente.

**d) Arrêté interministériel du 29 novembre 2008 définissant la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique**

En application de l'article 6 du décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005, le présent arrêté a pour objet de définir la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage

---

<sup>7</sup> CNERIB fut crée par le décret n° 85-235 du 5 Aout 1985

domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique.

- Les réfrigérateurs, les congélateurs et les appareils combinés à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique, sont classés suivant leurs efficacités énergétiques.
- Les climatiseurs à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique sont classés suivant leurs efficacités énergétiques.
- Les lampes domestiques soumises aux règles spécifiques d'efficacité énergétique et fonctionnant à l'énergie électrique sont classées suivant leurs efficacités énergétiques.

## II-4-2-Le Potentiel National en énergies renouvelables

### II-4-2- 1-Potentiel Solaire

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kwh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. [MEM, 2007].

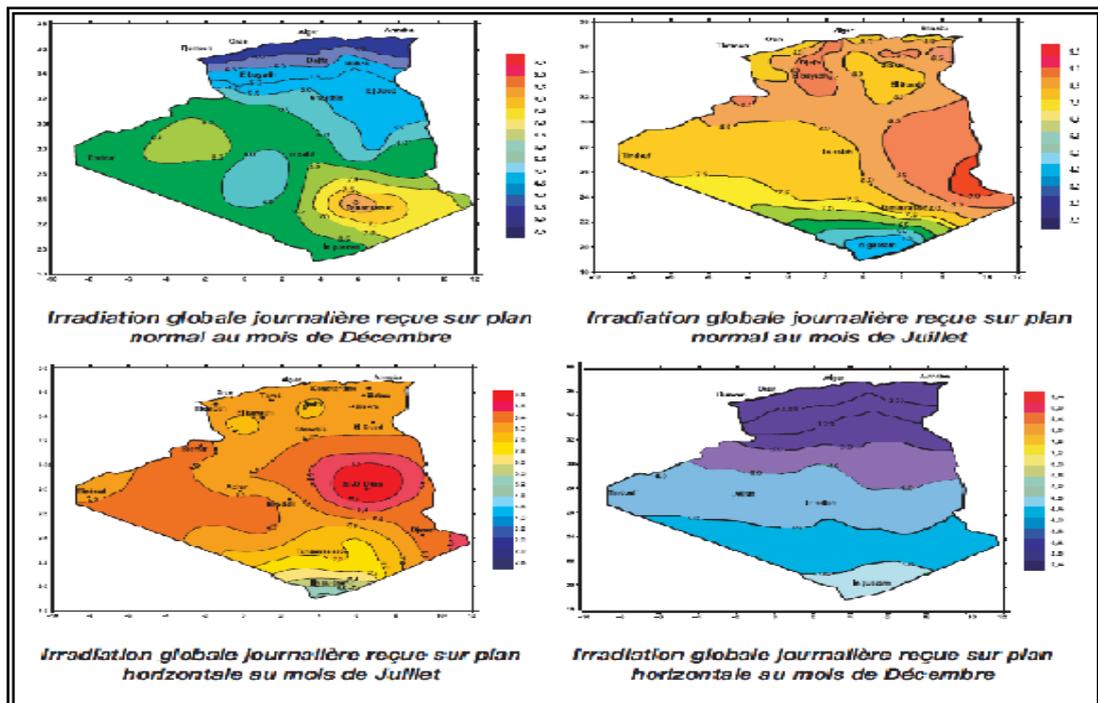


Figure II-25: L'énergie solaire en Algérie

(Source : MEM, 2007)

### II-4-2- 2-Potentiel Eolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. [MEMet des Mines, 2007]. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. [MEM, 2007].

Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépasse la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud [MEM, 2007].

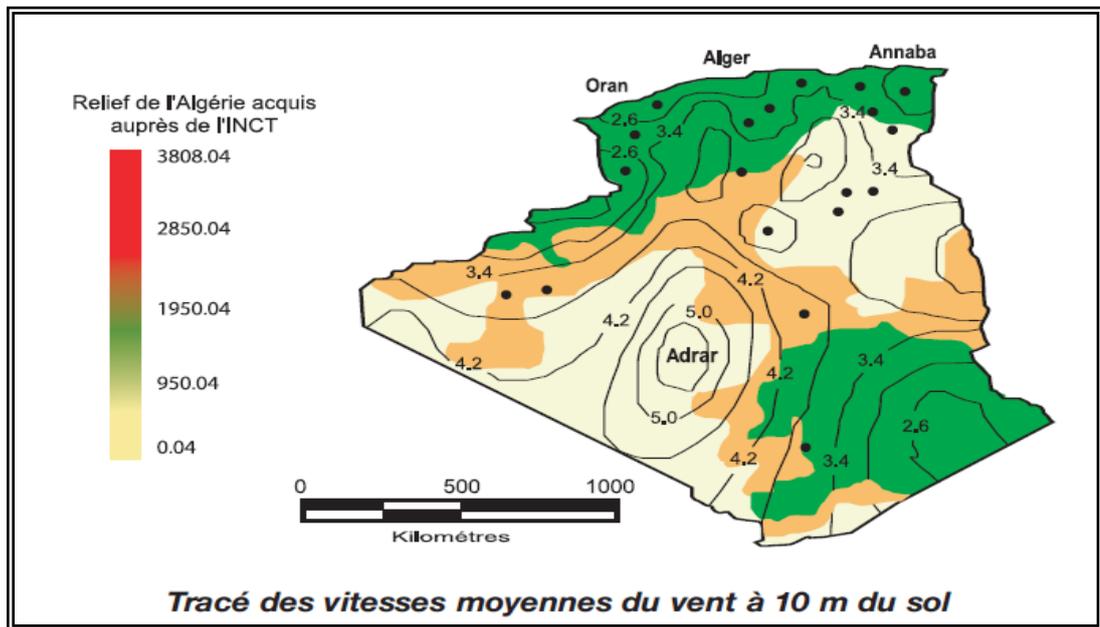


Figure II-26 : L'énergie Eolienne en Algérie  
(Source : MEM, 2007)

### II-4-2- 3-Potentiel Géothermique

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord et le Sud algérien, ces études montrent que l'Algérie compte un nombre important de sources thermales.

Les calcaires jurassiques du Nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement

dans les régions du Nord-Est et Nord- Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96°C). Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs [Rezig,1991].

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km<sup>2</sup>. Ce réservoir, appelé communément « nappe albienne » est exploité à travers des forages à plus de 4 m<sup>3</sup>/s. l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C ainsi que la roche chaude.[Rezig, 1992].

Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albienne au débit total des sources thermales, cela représenterait, en termes de puissance, plus de 700 MW. Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs.

Cette énergie qu'on va développer dans le prochain chapitre, s'est limitée principalement pour la balnéothérapie afin de promouvoir le tourisme et s'avère méconnue pour d'autres fins à savoir le bâtiment et la production d'électricité faute de cout d'installation, malgré la disponibilité du potentiel.

#### **II-4-2- 4-Potentiel de la forêt**

L'Algérie se subdivise en deux parties :

- les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares environ, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays.
- les régions sahariennes arides couvrant presque 90% du territoire.

Dans le nord d'Algérie, qui représente 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique: actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne. [MEM, 2007].

#### **Les déjections animales**

La valorisation des déchets organiques et principalement des déjections animales pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique avec une autonomie énergétique qui permettra un développement durable des zones rurales [MEM, 2007].

L'exploitation de ce potentiel énergétique caractérisé par sa diversification, s'est caractérisée par un monopole de l'énergie solaire suivi par l'Eolien pour seul usage : la production d'électricité, dans l'usage thermique s'avère méconnue.

### **II-4-3-La prise en charge du secteur de bâtiment en Algérie, dans le cadre de cette politique**

Dans le contexte climatique et énergétique actuel, il a été soutenu que la concrétisation de la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment, et particulièrement dans l'habitat, représente non seulement un gisement important d'économie d'énergie, mais également une occasion de protéger l'environnement en réduisant les impacts des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce cadre plusieurs actions ont été entreprises, dont l'APRUE est chargée de mettre en oeuvre des projets destinés à concrétiser des actions d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel. Ces projets visent un double enjeu : celui d'améliorer le confort des habitants en réduisant le recours excessif aux équipements énergivores et celui d'installer une pratique de la maîtrise de l'énergie chez les acteurs du secteur du bâtiment [APRUE, 2009].

Dans le cadre de la stratégie nationale de la maîtrise d'énergie, trois programmes phares relevant du secteur résidentiel ont été présentés à cette occasion. Il s'agit du programme [APRUE, 2009] :

- Eco Lumière consistant à diffuser un million de lampes économiques dans les ménages,
- Eco Bât consistant à réaliser 600 logements à haute performance énergétique, sur onze wilayas : Laghouat, Béchar, Blida, Tamanrasset, Alger (Hussein Dey), Djelfa, Sétif, Skikda, Mostaganem, Oran et El Oued. En partenariat avec les Offices de Promotion et de Gestion Immobilières (OPGI) .
- Alsol, consistant à produire de l'électricité et diffuser des chauffe-eau solaires individuels dans l'habitat.

Les objectifs de la stratégie de mise en oeuvre de chaque programme ainsi exposés ont suscité un intérêt particulier de la part de l'assistance constituée essentiellement de maîtres d'oeuvre et d'entrepreneurs dans le bâtiment [APRUE, 2009].

Sans oublier le projet Med- Enec, destiné aux pays de la Méditerranée, plusieurs propositions pour des projets pilotes sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. Ces projets cofinancés par l'Union Européenne, jouent un rôle important en matière de transfert

de technologie et de savoir-faire. Ils servent aussi de modèles à des fins pédagogiques et de reproductibilité [APRUE, 2009].

## **II-5-Conclusion**

L'étude bibliographique présentée dans cette partie a permis d'identifier les techniques pour l'intégration de la composante énergétique dans le bâtiment puisées des principes de l'architecture bioclimatique qui reposent principalement sur la maîtrise des potentialités du site, les caractéristiques thermo physiques des matériaux de construction et l'exploitation des énergies renouvelable disponible sur le site de construction sous ses différentes formes (passive ou active), inscrite dans un cadre réglementaire bien précis. Cette combinaison énergie renouvelable – bâtiment peut contribuer à réduction des consommations d'énergie primaire et de réduire les impacts environnementaux associés.

Vu l'importance du potentiel en énergies renouvelables que l'Algérie est en mesure de l'exploiter comme des énergies de substitution aux énergies fossiles, leurs insertions devraient être encouragées auprès du grand public afin de préparer dès à présent les générations du futur à la gestion de l'énergie.

Dans le nord du pays, cela se traduirait par une économie d'énergies fossiles qui est la ressource économique principale (réserver les énergies fossiles pour des utilisations profitant à l'économie du pays comme l'industrialisation, le transport, la production des moyens de production, la vente à l'étranger).

Dans le sud du pays, cela enclencherait le développement des zones les plus déshéritées en matière d'énergie électrique (que la zone soit agricole ou habitée, son isolement peut la priver de moyens d'électrification ou d'irrigation. Certaines zones habitées au nord comme au sud sont dans la situation où l'acheminement d'énergie électrique atteint un prix prohibitif).

Quant au secteur du bâtiment, réputé plus énergétivore par rapport aux autres secteurs économiques, l'intégration de ces énergies et le recours aux principes de l'architecture bioclimatique s'avèrent nécessaires, notamment pour répondre aux besoins accrus en matière du confort thermique (chauffages, climatisation.).

### III-1- Introduction

Une grande partie des besoins énergétiques découle du chauffage et du refroidissement des bâtiments. L'évolution actuelle marquée par les progrès réalisés dans les techniques d'isolation des enveloppes du bâtiment contribue à réduire la consommation de chaleur et, d'autre part, l'augmentation du taux d'équipement des bâtiments, entraînent des besoins accrus en électricité. Alors que les réserves des sources d'énergie fossiles terrestres en voie d'épuisement attirent l'attention de tous, on commence tout juste à s'intéresser à une forme d'énergie durable et exempte d'émissions polluantes qui se trouve juste à côté : la chaleur terrestre. Elle présente un potentiel considérable et se trouve l'une de nos sources d'énergie les plus prometteuses.

Aujourd'hui, la politique internationale de lutte contre le changement climatique et la sécurité énergétiques qui vient de trouver une traduction dans la politique nationale de maîtrise d'énergie, les accords internationaux, Protocole de Kyoto, Fonds pour l'Environnement Mondial, ... crée des mécanismes favorables au développement des énergies renouvelables, notamment dans le secteur du bâtiment.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la filière géothermique, comme une énergie de substitution aux énergies fossiles qui se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de techniques utilisées et des besoins, les applications sont multiples au service du bâtiment qui correspond à une production de chaleur à faible niveau de température, dont les enjeux pour cette énergie à court et moyen terme portent sur le développement de la production thermique pour l'habitat et le tertiaire (chauffage, confort d'été, eau chaude sanitaire). L'objectif de ce chapitre est de voir qu'elle est la filière géothermique la plus appropriée à la fonction du bâtiment qui pourra répondre aux besoins de rafraîchissement.

### III-2-Généralité sur la géothermie

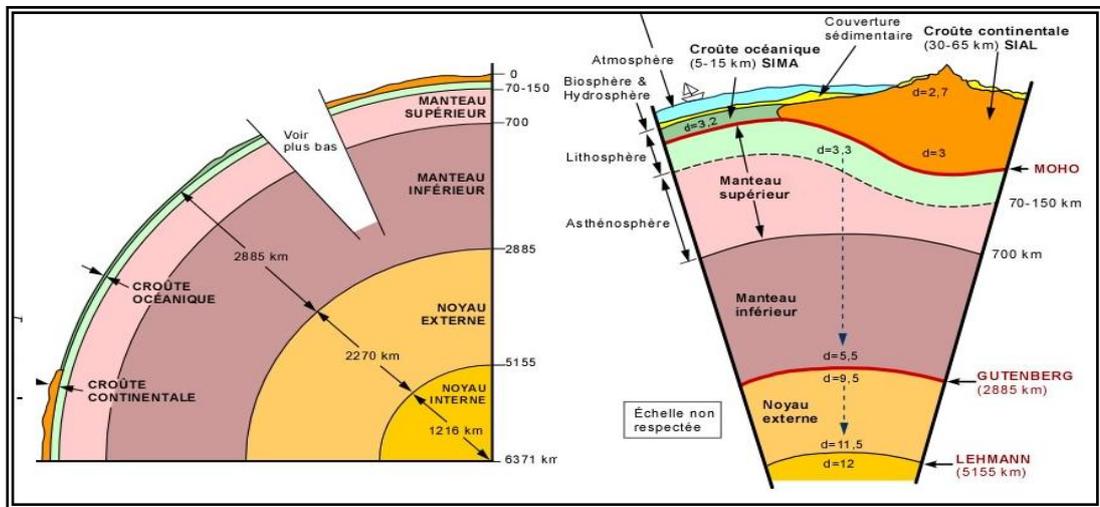
#### III-2-1-Origine de la chaleur terrestre

La terre reçoit du soleil un flux de chaleur de  $1,76 \cdot 10^{17}$  W [Wiesefeld, 2005] au dessous de l'atmosphère, mais produit également une chaleur interne de 40 TW, soit 4000 fois moins. Cette chaleur appelée géothermie «nom d'origine grecque : géo qui veut dire terre, Thermos qui signifie la chaleur ». Elle est constituée de trois zones concentriques [Sarlos et al, 2003] :

- **le noyau** : le noyau de la terre est constitué du fer, il se compose d'une zone interne solide (la graine) entourée d'une zone externe liquide. Le noyau interne a une

température près de 6000 K. Il se refroidit lentement par conduction thermique depuis la formation de la terre il y a 4,6 milliards d'années, ce qui se traduit par la dissipation de la chaleur à la surface de la terre [Sarlos et al, 2003].

- **le manteau** : d'une épaisseur de 50 à 2900 km de profondeur, avec des zones de circulation de chaleur à des températures de 900 à 3000 °C, le manteau est plus dense et plus plastique. il est constitué de roches qui sont des Silicates de magnésium et de fer[Sarlos et al, 2003].
- **la croûte (ou écorce) terrestre** : d'une épaisseur jusqu'à 50Km sous les continents et de 5 à des km sous les océans entourés du manteau, formé principalement par de roches granitiques dans la partie supérieure et des roches basaltiques dans sa partie inférieure, roches qui sont essentiellement des silicates d'aluminium [Sarlos et al, 2003].



**Figure III- 01** : structure interne de la terre  
(Source : Sarlos et al, 2003)

Cependant, la source principale de la chaleur interne dissipée en surface n'est pas due au refroidissement du noyau mais à la désintégration isotrope des roches contenues dans le manteau et la croûte terrestre. Les éléments chimiques radioactifs responsables sont : l'uranium, le thorium et le potassium [Sarlos et al, 2003].

Au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol, la température s'accroît en fonction de ce qu'on appelle le gradient géothermique. Ce gradient correspond à l'élévation de la température en 0,3 °C, pour une augmentation de profondeur d'un mètre, il est généralement de 3 °C pour 100 m de profondeur. Il est naturellement variable en fonction du terrain traversé : 3 °C par 100 m pour les régions sédimentaire et jusqu'à 1000 °C par 100 m pour les régions

volcaniques, zone de rift comme Island et la nouvelle zélande. Le flux géothermique moyen à la surface est de  $0,06 \text{ W/ m}^2$ , il peut atteindre dans certaines régions particulièrement actives la valeur de  $1 \text{ W/ m}^2$ . [Parriaux et Arnould, 2003].

De façon générale, le transfert de la chaleur se fait à la fois par conduction et par convection. Toutefois si la roche est imperméable, le transfert se fait uniquement par conduction.

### III-2-2-Gisements géothermiques

La chaleur géothermique peut être exploitée grâce à la présence d'un véritable gisement où se trouve stockée l'énergie calorifique. On englobe sous terme géothermie deux manières d'utilisation du sous sol. Ce gisement est constitué par une masse minérale chaude suffisamment fissurée et perméable à l'eau (fluide caloporteur), il permet la production d'électricité grâce à la chaleur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter les turbines. Et d'autre part, la possibilité d'utiliser le sous sol comme accumulateur de chaleur.

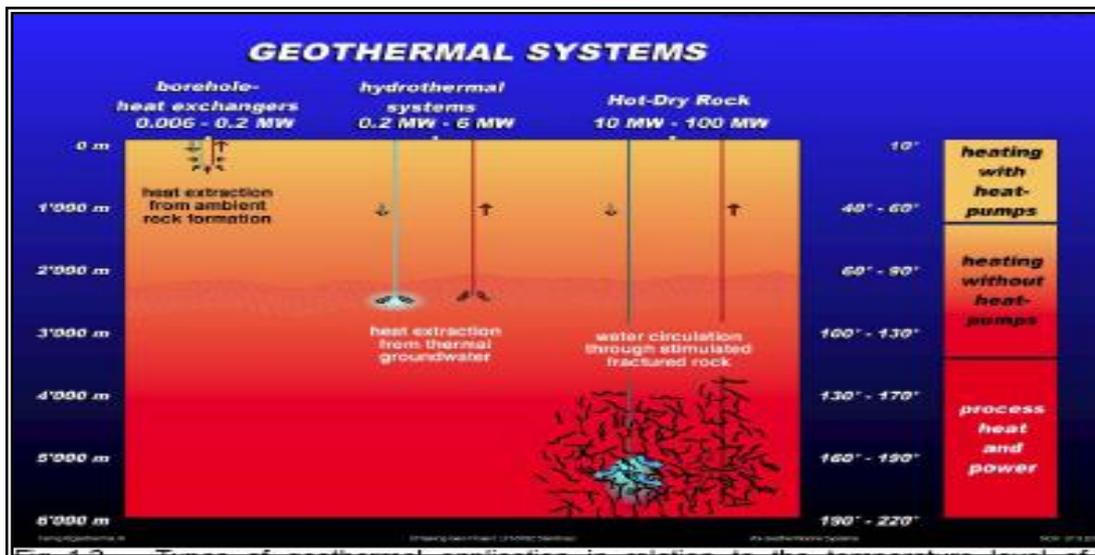


Figure III- 02 : Gisement géothermique  
(Source : Pahud, 2002)

Il convient toutefois de distinguer quatre types de géothermie [Sarlos et al, 2003].

#### III-2-2-1-La géothermie haute température (T> 150 °C)

Elle est exploitée à partir des sources hydrothermales très chaudes, où des forages très profonds où l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est utilisée pour produire de l'électricité [Sarlos et al, 2003].

### **III-2-2-2-La géothermie moyenne température**

Elle est caractérisée par une température allant de 80 à 150 °C, cette température ne permet pas la production directe de l'électricité (nécessite une technologie utilisant fluide intermédiaire) [Sarlos et al, 2003].

### **III-2-2-3-La géothermie basse énergie (30 °C < T < 100 °C)**

La géothermie des nappes profondes : nappes phréatiques (entre quelque centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C, exploitée principalement pour le chauffage urbain. La production de chaleur au moyen d'une pompe à chaleur sur nappe, repose sur le prélèvement et le transfert de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer. Par ailleurs, une pompe à chaleur peut assurer simultanément et/ou successivement des besoins en chauffage et/ou climatisation [Sarlos et al, 2003].

### **III-2-2-4-La géothermie très basse énergie**

Elle est disponible partout, en tout point de la planète, y compris dans les zones de socle cristallin, la température est comprise entre 10 °C et 30 °C. La chaleur ne provient pas seulement de l'énergie interne de la terre, mais en grande partie de l'inertie thermique du sous sol (mauvais conducteur en surface) qui emmagasine la chaleur provenant du rayonnement solaire et de ruissellement de l'eau de pluie, appliquée directement au bâtiment à un prix bas pour la climatisation passive (le système du puits provençal), le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique, la production d'eau chaude sanitaire [Sarlos et al, 2003].

## **III-2-3-Les principaux types de ressources géothermiques**

La chaleur géothermique peut être exploitée grâce à la présence dans le sous sol de véritables gisements où se trouve stockée l'énergie calorifique, selon la nature du terrain, on classera ces ressources en quatre catégories : les réservoirs de vapeur, les réservoirs d'eau, la roche chaude et les ressources superficielles tel que le stockage saisonnier et les aquifères proches [Bobin et Nifenecker, 2005].

### **III-2-3-1-Réservoirs de vapeur**

Si l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle pourra être récupérée sous forme de vapeur sèche, directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales électriques. Cependant, ces gisements de vapeur sont relativement rares : dans le monde entier, on ne

connaît guère que Labello (Italie), les Gisers (Californie), Masrsakama (Japon). [Bobin et Nifenecker, 2005].

### **III-2-3-2-Réservoirs d'eau chaude**

Le plus souvent l'eau de gisement géothermique reste liquide suivant sa température, elle se situe soit en profondeur ou proche de la surface, elle peut être utilisée, soit pour le chauffage, soit pour la production d'électricité. Dans ce dernier cas, la baisse de pression que subit l'eau chaude pendant la remontée vers la surface produit sa vaporisation, de sorte qu'en tête du puits on dispose d'un mélange diphasique eau-vapeur. [Bobin et Nifenecker, 2005].

### **III-2-3-3-Les gisements de roches chaudes sèches**

Ils constituent une réserve de chaleur très importante puisque l'exploitation de la chaleur contenue dans une sphère de 1 km de rayon permettant d'alimenter pendant un siècle, une centrale électrique de 100 MW. Si l'existence du gisement est évidente, il existe en tout point du globe des roches sèches, comme le granit par exemple, qui sont à des températures d'ordre de 250 °C à 300 °C, à 600 m de profondeur [Bobin et Nifenecker, 2005].

### **III-2-3-4-Les stockages saisonniers (en surface)**

Dans l'exploitation géothermique, la chaleur terrestre n'est pas en fait que consommée. En revanche, dans le cas du stockage thermique souterrain, nous assisterons à un cycle périodique de charge et de décharge [Pahud, 2002].

Le cycle périodique de charge et de décharge permet l'exploitation combinée des stocks souterrains pour le chauffage et la climatisation. En hiver, la chaleur est prélevée du stock souterrain et utilisée à des fins de chauffage en recourant à une pompe à chaleur. En été, on exploite les températures relativement basses du stock souterrain pour la climatisation permettant ainsi de le recharger [Pahud, 2002]

Le terrain possède de manière générale de très bonnes propriétés de stockage de chaleur spécifique volumique qui est de 0.42 à 0.78 kWh/m<sup>3</sup>.K et sa conductivité thermique s'étend de 1 à 3 W/m.K, voir plus. L'exploitation de ce stockage souvent assisté par des échangeurs thermiques ou pompes à chaleur quand il s'agit de capteur souterrain horizontal ou bien par des sondes géothermiques verticales [Pahud, 2002]

## **III-3- les caractéristiques de la géothermie**

### **III-3-1- La disponibilité de la géothermie**

Par nature, la géothermie est une énergie locale, à consommer sur place. Entre la chaleur du sous-sol et les activités humaines de surface, des liens sont possibles pour adapter la ressource aux besoins, ou les besoins aux ressources. On évite ainsi les pertes d'énergie induites par le transport de l'électricité et les pollutions provoquées par le transport routier du fioul. En outre on assure un développement local.

A la différence des énergies fossiles les plus utilisées aujourd'hui, ces réserves ne sont pas situées dans quelques sites particuliers, éventuellement désertiques ou au fond des mers. La chaleur du sous sol est présente sur tous les continents, offerte à tous les hommes. Evidemment, selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches, cette énergie sera plus ou moins facile à extraire, mais les technologies existent aujourd'hui pour permettre un développement planétaire de la géothermie [Geitmann, 2007].

### **III-3-2- L'indépendance de la géothermie aux conditions climatiques**

Contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, la géothermie n'est pas tributaire des conditions climatiques. Elle ne dépend que des caractéristiques intrinsèques du sous-sol (gradient géothermique, perméabilité des roches...), une constance qui assure une grande régularité dans sa mise en œuvre. Ainsi, le taux de disponibilité des centrales géothermales électriques est de 90% en moyenne et peut atteindre 100% pour les réseaux de chaleur [Geitmann, 2007].

### **III-3-3- La géothermie et l'environnement**

Une exploitation géothermique produit peu de rejets. La quantité moyenne de CO<sub>2</sub> émise dans l'atmosphère par les centrales géo thermoélectriques dans le monde (estimation faite sur 73% du parc mondial) est de 55 g/kWh, alors qu'une centrale au gaz naturel en produit 10 fois plus. Ce niveau peut être ramené à des valeurs nulles par la réinjection des fluides géothermaux dans les réservoirs dont ils sont issus - une technique largement répandue aujourd'hui. C'est donc une énergie propre qui ne participe pas à la dégradation du climat comme le font les énergies fossiles [Suisse énergie, 2006].

### **III-3-4- La géothermie le cout d'investissement et d'exploitation**

Elle est économique. L'accès à une ressource géothermale nécessite un investissement de base élevé, constitué essentiellement par la réalisation d'un ou plusieurs forages et d'une centrale. Mais son coût d'exploitation est faible et est de plus en plus compétitif avec les

énergies fossiles, dont les prix vont croissant avec la raréfaction des ressources. [Suisse énergie, 2006].

### **III-3-5- La géothermie et les énergies renouvelable**

En 2000, elle a été classée au 4<sup>ème</sup> rang des énergies renouvelables avec 49 TWh derrière hydraulique (2600 TWh) et Biomasse (157 TWh) [BRGM, 2004]. Contrairement aux réserves fossiles, la géothermie ne se vide pas de son réservoir au fur et à mesure que l'on s'en sert. Le vecteur, de l'eau piégée ou transitant dans le sous-sol, se renouvelle soit naturellement par le ruissellement des eaux de surface, soit par l'option technologique de l'injection artificielle. Quant à la chaleur, elle est contenue dans la roche qui représente 90% ou plus du gisement [Suisse énergie, 2006].

## **III-4-Utilisation de la géothermie**

### **III-4-1- Développement historique**

L'énergie géothermique est mise à profit par l'homme depuis fort longtemps. Les hommes préhistoriques s'abritaient dans des grottes afin d'échapper aux rigueurs des périodes froides des glaciations. Ils bénéficiaient ainsi de quelques degrés supplémentaires fournis par la chaleur d'origine géothermique [Sarlos et al, 2003] :

Mais ce sont des manifestations plus évidentes de cette énergie que les hommes se sont rapidement attachés à exploiter : les Romains utilisent l'eau chaude d'origine géothermique pour le chauffage domestique, ainsi pour les soins hygiéniques et médicaux. Puis utilisée pour la cuisson [Sarlos et al, 2003].

On peut fixer le début d'utilisation de l'énergie géothermique à une échelle industrielle à 1827, année où François de Larderel, installé en Toscane, eut l'idée de capter la chaleur jaillissant des étangs boueux pour chauffer des chaudrons. En 1904, le site de Montecerboli (Larderello) devint le site pionnier de l'utilisation moderne de l'énergie géothermique en produisant pour la première fois de l'électricité à partir de la vapeur naturelle [Sarlos et al, 2003].

Jusqu'à l'époque moderne, la géothermie, c'est-à-dire l'exploitation de la chaleur de la Terre, s'est limitée à l'utilisation des sources chaudes. Depuis deux siècles, la pratique des forages de plus en plus profonds a ouvert d'autres possibilités et l'on sait maintenant utiliser, suivant des techniques différentes, la chaleur du sous-sol immédiat (13 à 15°C), des faibles

profondeurs (quelques dizaines de mètres), des profondeurs moyennes ou des grandes profondeurs (jusqu'à 5 à 6 km) [Sarlos et al, 2003].

### III-4-2- Les diverses applications de la géothermie

- alimentation d'un réseau de chaleur pour l'habitat collectif ;
- Le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la climatisation d'entreprises, d'équipements publics ou d'habitats individuels ;
- le chauffage de serres par air ou par sol constitue un domaine important d'application de la géothermie car beaucoup d'énergie est nécessaire pour ce type d'agriculture : en moyenne 200 tonnes de fioul par hectare et par an pour des cultures florales ;
- la pisciculture et géothermie vont bien ensemble : une augmentation de la température de quelques degrés et surtout le maintien d'une température constante suffisent à augmenter le métabolisme des poissons et crustacés. Une installation de pisciculture comporte un puits unique ou un doublet. L'eau chaude est utilisée directement, ou au travers d'un échangeur quand sa nature n'est pas compatible avec l'élevage ;
- une majorité des usages industriels directs a lieu entre 100 et 200°C. Dans ce domaine des hautes et moyennes énergies, le fluide se présente sous forme d'eau et de vapeur. Il peut servir pour le lavage de la laine, le séchage des produits industriels, l'extraction de substances chimiques, la fabrication de pâte à papier ou l'évaporation de solutions concentrées ;
- enfin, des thermes classiques aux piscines olympiques en passant par des centres de vacances sous bulle avec animaux exotiques, plantes tropicales et toboggans d'eau chaude, les applications de loisirs de la géothermie ont un bel avenir.

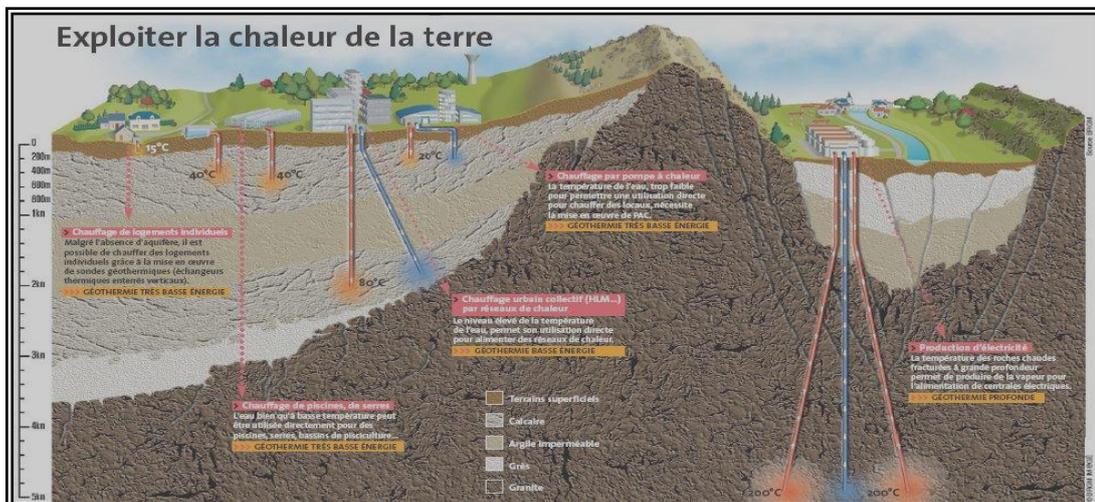


Figure III- 03 : les exploitations géothermiques (Source : www.brgm.fr)

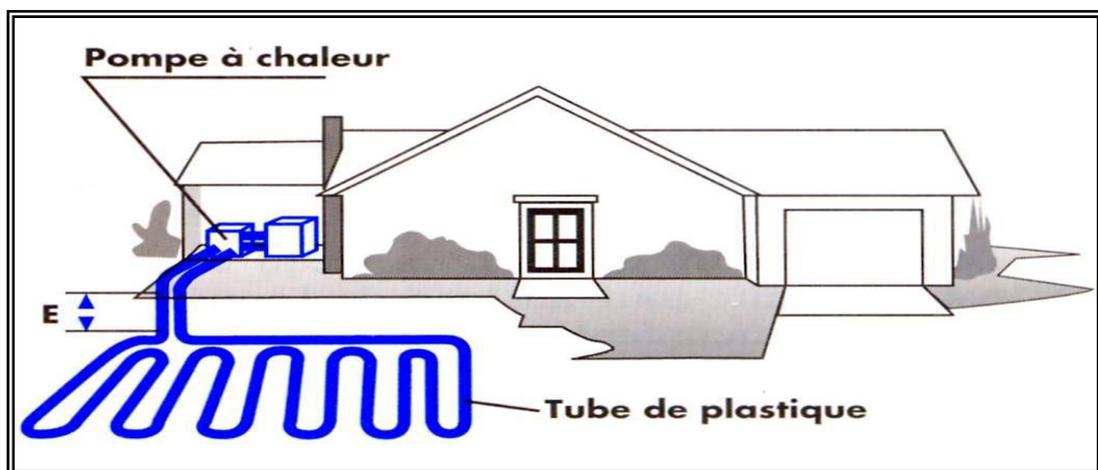
### III-4-3- Les applications de la géothermie basse et très basse température pour répondre aux besoins thermique (chauffage – climatisation) dans le bâtiment

#### III-4-3-1- La géothermie basse énergie

L'énergie du sous-sol peut être prélevée quel que soit son niveau de température. La pompe à chaleur permet de transférer la chaleur d'une source froide vers un milieu à chauffer moyennant une faible dépense d'énergie. C'est la géothermie basse température.

Parmi les pompes à chaleur géothermiques se distinguent trois types de pompes [BRGM, 2004] :

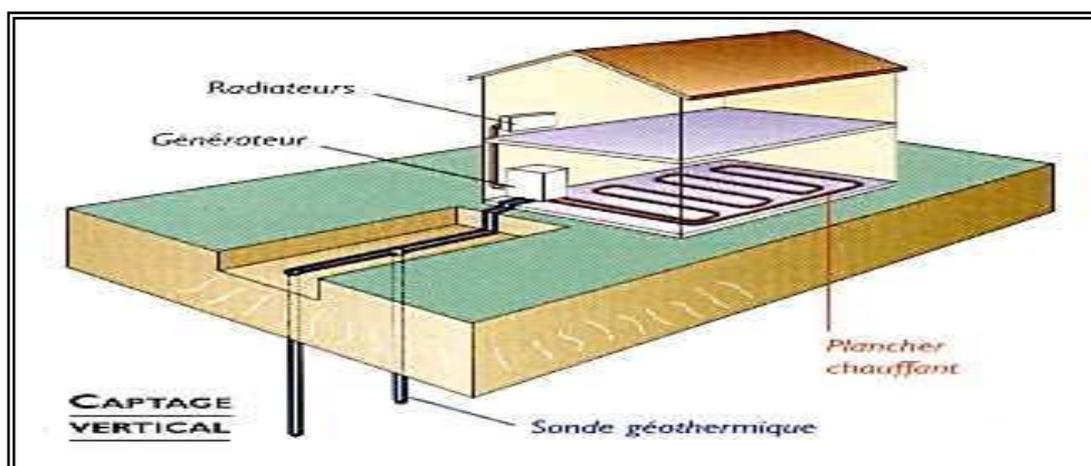
- les pompes à chaleur sur aquifères peu profond, profondeur inférieure à 100 mètres. Cette filière est particulièrement bien adaptée aux immeubles collectifs et aux immeubles du tertiaire, jusqu'à 10 000 m<sup>2</sup>, ayant des besoins de chauffage et de climatisation ;
- les pompes à chaleur par échange avec le sol, utilisant des capteurs horizontaux. Ces pompes n'utilisent pas à proprement parler l'énergie du sous-sol. En effet, elles sont installées dans le sol, à une profondeur allant de 60 à 120 centimètres. Il s'agit alors plutôt d'énergie solaire : ce sont les calories apportées par le réchauffement solaire qui sont récupérées sur ces profondeurs. Il faut en général une surface de capteurs équivalente à 1,5 fois la surface à chauffer. Ce système est bien adapté aux maisons individuelles neuves.



**Figure III- 04 :** Capteur géothermique horizontal  
(Source : Pahud, 2002)

Certains pays Européens ont beaucoup développé le recours à cette technologie, notamment la Suisse où les pompes à chaleur par échange avec le sol, utilisent des capteurs verticaux. Elles ont l'avantage de pouvoir être installées en n'importe quel lieu. L'échange se fait par

circulation d'eau glycolée dans un tube en U, descendu dans un ou deux forages. Contrairement à la catégorie des pompes à capteurs horizontaux, elles ne nécessitent pas l'utilisation d'une grande surface. Le chauffage d'un pavillon de 100 m<sup>2</sup> peut être assuré par une sonde de 70 mètres de profondeur environ. Si leur coût d'investissement est encore élevé, elles sont susceptibles de fournir un COP intéressant et constant toute l'année [BRGM, 2004].



**Figure III- 05:** Sonde géothermique verticale  
(Source : Pahud, 2002)

Au-delà des différents types de PAC, il existe des procédés différents :

- le procédé à détente directe est celui dans lequel le fluide frigorigène circule dans les capteurs et le plancher chauffant. Les constructeurs parlent alors de PAC sol /sol et ne sont utilisables qu'avec des capteurs horizontaux ;
  - le procédé avec fluide intermédiaire est celui dans laquelle eau additionnée d'antigel circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage. Le fluide frigorigène reste donc confiné dans la PAC. On parle de PAC de type eau glycolée / eau. Ce procédé est utilisable en capteurs verticaux ou horizontaux ;
  - enfin le procédé mixte est celui dans lequel le fluide frigorigène de la PAC circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage. Les PAC sont alors de type sol / eau et ce procédé n'est utilisable qu'avec des capteurs horizontaux.
- Les PAC géothermiques offrent une large gamme de produits et d'applications : chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire. En fonction des techniques utilisées, elles peuvent couvrir l'ensemble des secteurs de l'habitat et du tertiaire, de la maison individuelle aux grands immeubles de bureaux.

### III-4-3-2- La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est définie par l'exploitation d'une ressource présentant une température inférieure à 30°C. Elle nécessite souvent donc la mise en œuvre de pompes à

chaleur qui prélèvent cette énergie à basse température pour l'augmenter à une température suffisante pour le chauffage d'habitations, par exemple.

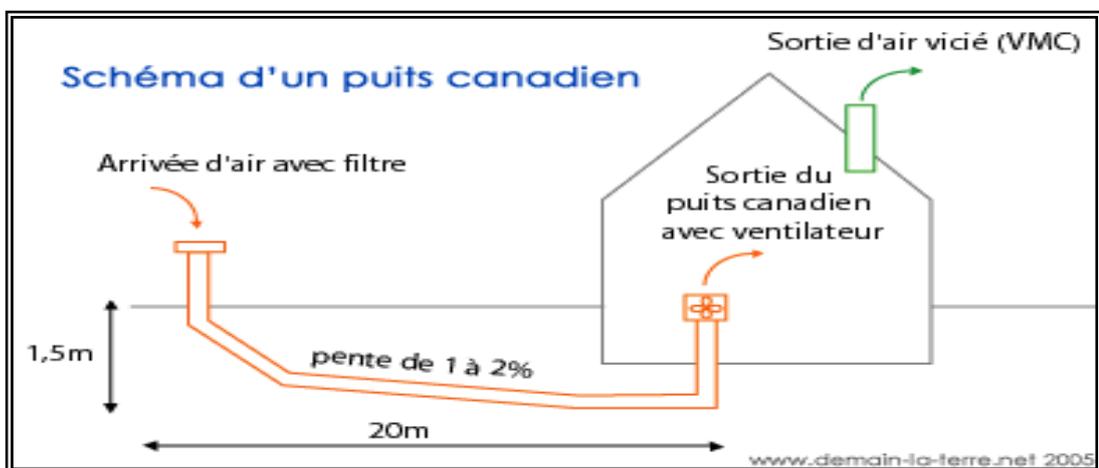
La géothermie très basse énergie concerne l'exploitation de deux types de ressources : l'énergie présente dans le sol à quelques mètres – voire une centaine de mètres - de la surface et dans les aquifères qui s'y trouvent.

En France, la température moyenne au niveau du sol est en général de 10 à 14°C et au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol, celle-ci augmente en moyenne de 3°C tous les 100 mètres (gradient géothermal).

Le concept de géothermie très basse énergie recouvre des applications qui vont du chauffage de maisons individuelles jusqu'au chauffage par réseau de chaleur. Ce type de géothermie se montre particulièrement adapté au chauffage de logements collectifs ou de locaux du secteur tertiaire (hôpitaux, administration, centres commerciaux, piscines, etc.).

Les principales utilisations de la géothermie très basse énergie sont l'horticulture, la pisciculture, le chauffage et la climatisation :

- utilisation directe en horticulture (chauffage des serres) et en pisciculture (alimentation en eau chaude des bassins d'élevage de poissons) ;
- utilisation indirecte avec une pompe à chaleur pour élever ou abaisser le niveau de température (application au chauffage et à la climatisation).



**Figure III- 06** : Schéma de puits canadien (exploitation géothermique très basse température)  
(Source : Pahud, 2002)

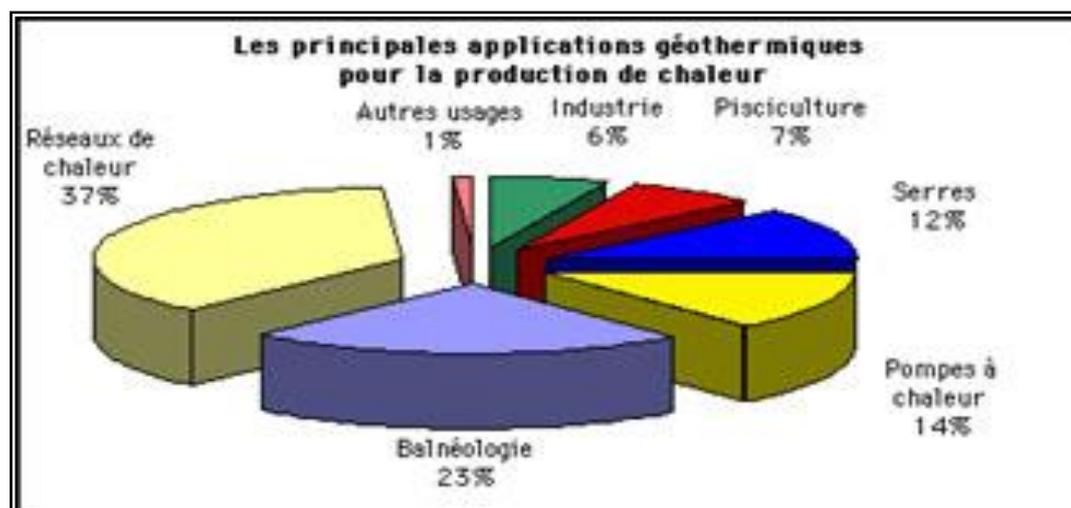
Les équipements géothermiques sont plus onéreux à l'installation que les systèmes traditionnels : il faut compter environ 9 200 € pour une maison de 120 m<sup>2</sup> [BRGM, 2004]. En revanche, ces systèmes sont d'un entretien limité et sont plus vite rentables : 75 % d'économie d'énergie par an par rapport au chauffage électrique, 60 % par rapport au gaz Propane, 50 % par rapport au fuel ou au gaz naturel. A titre d'exemple, pour chauffer une maison de 75 à 100 m<sup>2</sup> habitables, dotée de planchers chauffants, cela revient chaque année à environ 185 € (pour l'essentiel, l'électricité qui alimente la pompe) [BRGM, 2004], trois fois moins cher qu'avec le fioul. La géothermie basse et très basse énergie (forages de faibles profondeurs et pompes à chaleur) sont déjà utilisées à grande échelle en Suisse et en Allemagne et pourraient permettre à notre pays de réaliser rapidement, et sans investissements trop coûteux (amortissement moyen en 5 ans), d'importantes économies d'énergies fossiles dans pour le rafraichissement des bâtiments publics et des habitations privées.

### **III-5-La géothermie dans le monde**

En fonction des conditions géologiques locales, les installations géothermiques diffèrent d'un site à l'autre. La tendance mondiale est à la multiplication de ce type d'installations. Ces dernières années, la production d'énergie issue de la géothermie a progressé de 4 % par an dans le monde [BRGM, 2004]. De ce fait on distingue :

#### **III-5-1-La production de chaleur**

La puissance installée dans les 55 pays qui déclaraient utiliser directement cette source en 2000 est estimée à 15 GW et l'énergie utilisée à 53 TWh/an, ce qui équivaut à 1% de la consommation d'énergie mondiale. Les principaux pays producteurs sont le Japon, la Chine, l'ex-URSS, les pays d'Europe centrale et orientale et les Etats-Unis. Selon les dispositifs employés et le niveau de la température, cette énergie est utilisée directement pour l'industrie (serre, pisciculture, séchage de produits agricoles, thermalisme), ou alimente un réseau de chaleur pour l'habitat collectif, le chauffage et la climatisation des entreprises ou de l'habitat individuel . Cette filière est en pleine progression : en Europe, son taux de croissance a été de 4,3% en 2001 et 2002 (1 051,6 MW en 2002). Elle devrait également connaître un développement important dans les pays où les ressources sont abondantes (Europe centrale et orientale, Russie et Chine) [Sarlos et al, 2003].



**Figure III- 07** : les principales applications géothermique pour la production de chaleur  
(Source : BRGM, 2004)

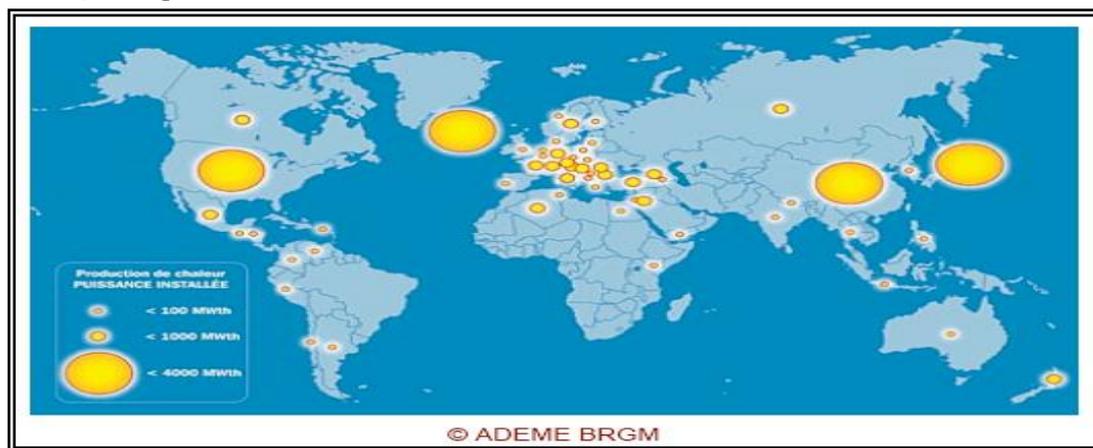
### III-5-2-La production d'électricité

On dénombre aujourd'hui un peu plus de 350 installations géothermiques haute et moyenne énergie dans le monde. La puissance mondiale de ces centrales électriques est d'environ 8 GW, ce qui ne représente que 0,2% de la puissance mondiale électrique installée sur la planète. Très loin derrière l'hydroélectricité, en nombre de MWh produits, la géothermie reste cependant, avec la biomasse et l'éolien, l'une des trois autres sources principales d'électricité par énergie renouvelable dans le monde. L'utilisation actuelle de cette ressource n'est pas équilibrée sur la planète. La disparité géographique de la production découle en partie de celle des ressources [Sarlos et al, 2003].

Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique : six dans les Amériques pour 3 390 MW, cinq en Asie pour 3 100 MW, deux en Océanie pour 437 MW. L'Europe compte six pays producteurs, pour une puissance de 1 000 MW, et deux seulement en Afrique pour 54 MW. La géothermie couvre 0,4% des besoins mondiaux en électricité. Toutefois, dans certains pays sa contribution aux besoins nationaux peut être bien plus élevée et atteindre plusieurs pour-cents. Avec 202 unités réparties sur 22 champs géothermiques (Californie, Nevada, Utah et Hawaii), les Etats-Unis arrivent en tête des pays producteurs avec une capacité installée de 2 220 MW et une production importante (15TWh/an), mais qui ne satisfait que 0,4% des besoins. Viennent ensuite les Philippines (1 900 MW), l'Italie (785 MW), le Mexique (755 MW), l'Indonésie (590 MW), le Japon (547 MW), la Nouvelle-Zélande (437 MW), l'Islande (170 MW), le Salvador (161 MW), et le Costa Rica (142 MW) [Sarlos et al, 2003].

En France, s'il n'existe pas en métropole de production d'électricité, c'est à Bouillante en Guadeloupe que se trouve la seule centrale électrique géothermique française (4,2 MW, auxquels devraient s'ajouter 10 MW supplémentaires en 2004). Outre la Guadeloupe, la ressource est présente dans les îles volcaniques en Martinique et sans doute à La Réunion. [Sarlos et al, 2003].

La géothermie comme source d'électricité devrait poursuivre son essor dans le monde (il fut de 11% par an pendant la dernière décennie). Les investissements se tournent vers les pays en croissance économique dotés de ressources : Philippines, Indonésie, Amérique latine,... [Sarlos et al, 2003].



**Figure III- 08:** Les installations géothermique pour la production d'électricité (Source : BRGM, 2004)

## III-6-La géothermie en Algérie

### III-6-1- L'état de la recherche

Dans le chapitre précédent, on a vu que l'Algérie dispose d'un potentiel en énergie géothermique important, notamment celle présente en permanence dans la surface de la terre (couche soumise aux variations saisonnières dont la température est stable, soit 17°C à 3 mètres de profondeur)[LMRE, 2009], capable de contribuer davantage pour mener à terme les objectifs du programme national de maîtrise d'énergie (PNME). De ce fait, plusieurs recherches ont été lancées notamment celle qui rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah, Alger et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980).

Parmi Les études menées dans le domaine de la géothermie en Algérie, on peut citer les travaux de F.Z. Kedaïd et M. Rezig, M. Abouriche et A. Fekraoui en 1988[CDER, 1988], de M. Rezig, en 1991[Rezig, 1991], de M. Rezig en 1992 [Rezig, 1992]. B. Bouchekima et Y. Babi

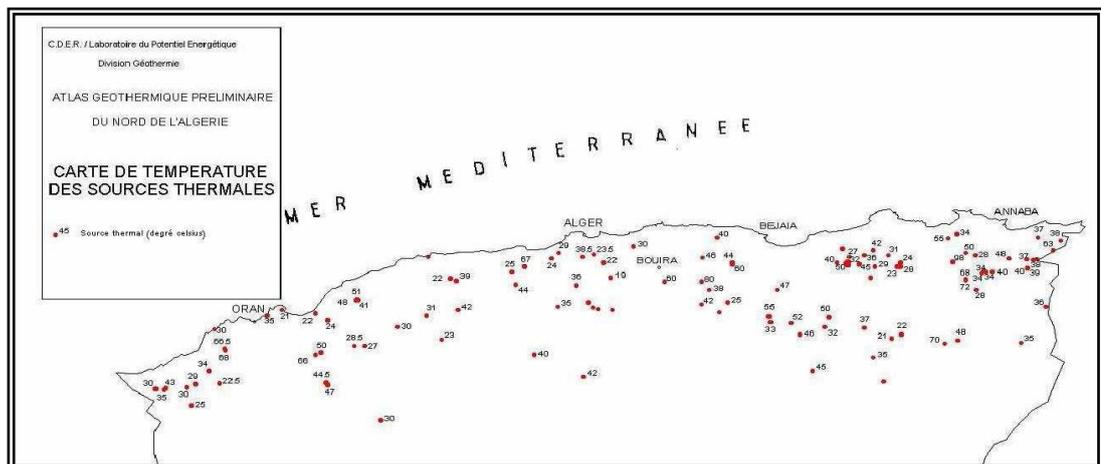
2001 [Boucekima et Babi, 2001]; D. Semmar , D. Lafri , A. Hamid, R. Kharchi et S. Sami [Semmar et al ,2002].

Ces études font état de l'existence de plus de 200 sources chaudes localisées principalement dans les régions du nord-est et Nord-Ouest du pays, avec 117 sources thermales principales, dont la température varie de 22 à 98 °C ces sources sont classées en 3 groupes suivant leur température d'émergence [MEM, 2007] :

- 54 sources méso thermales ( $22^{\circ}\text{C} < T < 37^{\circ}\text{C}$ ) ;
- 26 sources ortho thermales ( $37^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$ ) ;
- 37 sources hyperthermales ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ), la plupart d'entre elles se situent dans le Nord-Est, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine ( $98^{\circ}\text{C}$ ).

Les eaux de ces sources sont relativement minéralisées et la plus grande partie de ces sources présente des résidus secs supérieurs à 1 g/l, l'examen des résultats d'analyses chimiques montre la présence des faciès chimiques chlorurés sodiques, bicarbonaté sodique et sulfaté sodique [CDER, 1988].

Au sud, la nappe continentale intercalaire appelée « nappe albienne », constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km<sup>2</sup>, dont 68 forages ont des eaux hyperthermales ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ) et certains forages débitent à 4 m<sup>3</sup>/s. Les températures sont croissantes de l'ouest vers l'est de la nappe. Ainsi dans les régions de Touggourt, Hassi Messaoud et Ouargla les températures des eaux dépassent les 60°C, la température maximale atteint 84°C dans la région de Touggourt. L'ensemble du débit d'exploitation de la nappe albienne et du débit total des sources thermales, représente en termes de puissance plus de 700 MW [CDER, 2003 ; Ouali., 2006].



**Figure III- 09** : Carte de température des sources thermales du nord de l'Algérie (Source : MEM, 2007)

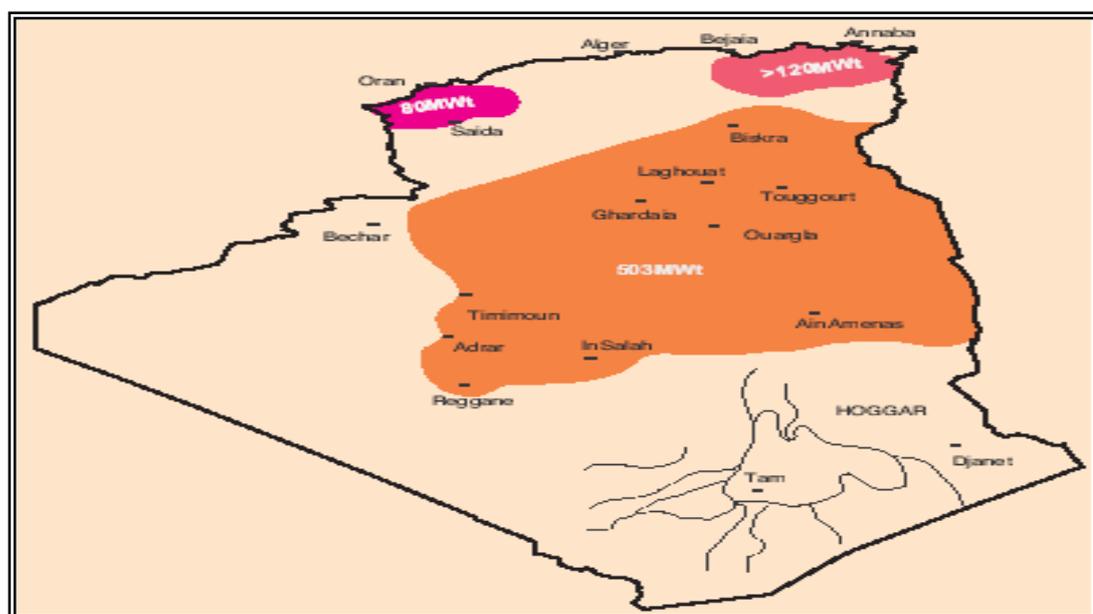
Quant au secteur du bâtiment, on peut évoquer l'étude réalisée par D. Semmar , D. Lafri , A. Hamid, R. Kharchi et S. Sami en 2002 [Semmar et al ,2002] portant sur la conception du chauffage des bungalows de Hammam Chellala par energie géothermique. Ce projet s'il venait à être réalisé, sera le point de départ effectif pour d'autres projets de recherche et développements de l'énergie en Algérie.

### III-6-2-Exploitation de la géothermie en Algérie

En Algérie, l'utilisation de la géothermie, voire les sources thermales se sont limitées pour la balnéothérapie, dont les sculptures découvertes dans les régions des hammams témoignent de l'existence des établissements balnéaires bien avant les Romains mais se sont surtout les Romains qui avaient bien développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales.

Aujourd'hui, bien que l'Algérie possède un potentiel géothermique très important, mais l'exploitation se restreint principalement à la balnéothérapie et encore moins aux usages domestiques.

Seulement, depuis 1990 une application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien, dans la région de Touggourt, où a eu lieu la première installation d'équipements destinée aux chauffages des serres, elle est assurée par l'équipe du laboratoire thermique du C.D.E.R [Ouali, 2006].



**Figure III-10** : Zones géothermique préférentielles et potentiel à l'exhaure  
(Source : MEM, 2007)

### **III-7- Conclusion**

Vieille comme le monde, la géothermie s'affirme bien comme une énergie d'avenir. Face à l'épuisement programmé des réserves d'énergies fossiles, la nécessité de préserver l'environnement et le réchauffement climatique dû à l'effet de serre impose de faire toute leur place aux énergies renouvelables. La géothermie est de celles-ci.

D'après cette illustration, on admet que la géothermie très basse énergie, connue sous le langage courant géothermie de surface, constitue un gisement inépuisable, pouvant servir comme solution alternative à la climatisation mécanique, pour répondre aux besoins du confort estival, et qui peut contribuer significativement à l'économie d'énergie.

## IV-1-Introduction

Il est utile de rappeler que les canicules successives liées au probable dérèglement climatique ont imposé la climatisation comme une évidence [Alain Liebard, André de Herde, 2005]. Ce phénomène qui a particulièrement marqué les pays méditerranéens, notamment l'Algérie, [Hetzl et al ,2007] se traduit par [Hyde, 2008]:

- les problèmes d'approvisionnement en électricité que pose la climatisation. Il s'agit à la fois des volumes produits, mais peut être surtout des problèmes que posent les pointes estivales.
- la production d'électricité est une source importante de nuisances environnementales, qu'elle soit produite par voie thermique classique (gaz, fioul, charbon) et génère de gaz à effet de serre, ou par voie nucléaire en produisant des déchets radioactifs.
- de lourds investissements et des coûts de fonctionnement importants, risques sanitaires et environnementaux.

Cette mesure est une réponse à la sensation d'inconfort thermique que ressent l'homme lorsqu'il transpire [Adolphe, 1998], faute de conception du bâtiment qui s'est faite sans tenir compte des particularités du site ainsi que des propriétés thermo physiques des matériaux de construction selon le climat lors de la conception [Lavigne et al , 1994].

De ce fait, et avec la remise en avant de la notion du confort thermique d'été concouru à l'idée qu'une climatisation des édifices pourrait être la panacée. Les pays, qui sont soucieux de limiter le recours à climatisation dans le but de contribuer significativement à la maîtrise d'énergie au même niveau que les exigences en matière de confort thermique estival, ont donc valorisée plus concrètement la conception bioclimatique, combinée avec des sources d'énergie renouvelable, parmi lesquels on trouve des méthodes simples de rafraîchissements passives, combinées à des mesures adéquates au niveau de l'enveloppe du bâtiment (bonnes protections solaires, inertie, ventilation naturelle), ayant pour objectif de maintenir la température intérieure dans la zone du confort. [Liebard et De Herde, 2005].

Parmi celles-ci le geocooling, application géothermique qui consiste à utiliser la fraîcheur du sous-sol, grâce à des sondes géothermiques verticales ou grâce à des systèmes horizontaux, proches du sol (puits canadiens ou provençal) objet de notre étude. Cette technique a été utilisée principalement pour répondre aux besoins de chauffage [IEA, 2002] avec peu d'expérience pour

répondre aux besoins de rafraîchissement, pourtant un potentiel important existe en ce qui concerne l'usage estival [Eicker, 2009].

L'objectif assigné à ce chapitre est d'expliquer cette technique de rafraîchissement passif, issue des principes de l'architecture bioclimatique, combinée à l'usage d'une énergie renouvelable, en l'occurrence la géothermie de surface, disponible en abondance et très souvent inutilisée en Algérie, qui nous permet de réduire le recours à la climatisation conventionnelle et de procurer un bon niveau de confort aux occupants en été à faible impact énergétique et environnemental.

## **IV-2- Modes de transfert de chaleur**

Les échanges de chaleur dans le bâtiment peuvent s'effectuer selon quatre modes de transport [Givoni.1978]:

### **- La conduction**

C'est le transfert de chaleur au sein d'un corps solide, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Fourier.

### **- La convection**

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton.

La convection est dite forcée si le fluide est mis en mouvement par une action extérieure (pompe, ventilateur, vent...). La convection est dite naturelle si le mouvement du fluide ne résulte que des différences de masse volumique induite par des différences de températures.

### **- Le rayonnement**

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Tout matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions à la suite des mouvements continuels de vibration de leurs molécules situées en surface. Il est régi par la loi de Stephan Boltzmann.

### **- L'évaporation- condensation**

L'évaporation et la condensation impliquent un changement de l'état liquide à l'état gazeux et vice versa et produit une absorption ou une émission de chaleur.

### IV-3- Le confort thermique estival

#### IV-3-1-L'équilibre thermique du corps humain, source du confort

Le confort thermique se définit comme la satisfaction exprimée à l'égard de l'ambiance thermique du milieu (norme ISO 7730)[ASHRAE, 2004]. Le niveau de confort thermique est influencé par l'activité et la tenue vestimentaire de l'individu d'une part et par les caractéristiques physiques de l'ambiance dans laquelle il se trouve, d'autre part.

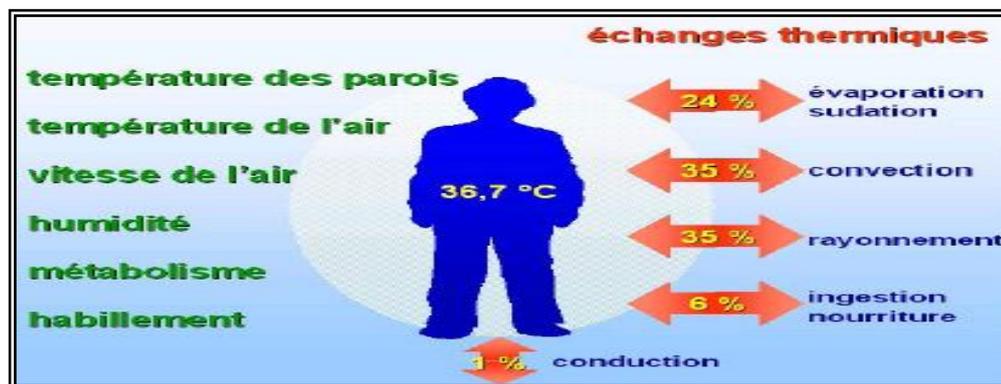
Mais la sensation de confort peut aussi être influencée par d'autres éléments comme l'état de santé, l'âge ou l'état psychologique de l'individu.

La sensation de confort thermique dépend de sept paramètres, trois sont relatifs à l'individu

- le métabolisme
- l'habillement
- la température du corps

Les quatre autres concernent l'ambiance dans laquelle l'occupant se trouve :

- la température ambiante
- la température des parois (température radiante : température moyenne des surfaces environnantes)
- l'humidité relative
- la vitesse de l'air



**Figure IV-1 :** les échanges thermiques du corps avec l'environnement  
(Source : Liebard et De Herde, 2005)

#### IV-3-1-1- Le métabolisme

Le métabolisme représente la production de chaleur interne du corps humain nécessaire pour maintenir la température constante à 36,8°C. Le métabolisme est représenté par l'effort physique dépensé dans une activité par rapport à l'unité de surface du corps de l'individu [Magali, 2002]. Dont on distingue :

- **le métabolisme de base** : nécessaire à la vie, il concerne la position couchée à jeun et dans les conditions telles que le corps n'ait à lutter ni contre la chaleur ni contre le froid. Pour une personne « normalisée » de 1,70 m, de 70 Kg et de 1,8 m<sup>2</sup> de surface corporelle, ce métabolisme est d'ordre de 75 W [Lavigne et al, 1994].
- **le métabolisme de repos** : chaleur minimale produite dans les conditions pratiques de repos du corps, par un individu n'ayant pas à lutter ni contre le froid ni contre la chaleur, il est d'ordre de 105W [Lavigne et al, 1994].
- **le métabolisme de travail** : qui dépend de niveau d'activité physique, à titre d'exemple : le travail de bureau : 105 à 140 W, travaux de ménages : 140 à 370 W, travaux continus maximaux : 700W [Lavigne et al, 1994].

#### **IV-3-1-2-L'habillement**

La perte de chaleur par évaporation a généralement lieu par diffusion de vapeur d'eau au travers de la peau, évaporation à sa surface, transport de chaleur à travers les vêtements par diffusion, et rayonnement de la surface de la personne vers les surfaces voisines. De plus, la surface des vêtements et celle de la peau échangent aussi de la chaleur par convection en fonction de la température et de la vitesse de l'air. En d'autres termes, l'habillement est l'isolation thermique de l'être humain [Magali, 2002].

#### **IV-3-1-3-La température du corps**

La température du corps prise en considération est la température de surface du corps ou température de la peau. Celle-ci n'est pas constante, elle varie principalement en fonction du métabolisme et de l'habillement [Magali, 2002].

#### **IV-3-1-4-La température ambiante**

La température ambiante est un des facteurs les plus importants, car plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain se font par convection et évaporation avec l'air ambiant [Magali, 2002].

#### **IV-3-1-5-La température des parois**

La température de surface des parois, dite température moyenne de rayonnement ou température radiante moyenne est la moyenne des températures des parois qui délimite l'ambiance considérée, proportionnellement à leurs surfaces [Magali, 2002]. La différence de température de surface interne des parois et celles des fenêtres doit être maintenue inférieure à 10 °C et la vitesse de l'air doit rester inférieure à 1,5m/s [ISO, 1993]. Ce paramètre influence

principalement les pertes de chaleur par rayonnement, par conduction à l'endroit de contact entre l'individu et les parois. A partir de ça, on peut définir **la température opérative**, comme une température qui tient compte de la température de l'air, du rayonnement et de la vitesse de l'air. À des fins d'approximation, la température opérative peut s'exprimer comme la moyenne entre la température de l'air et de la température rayonnante moyenne des surfaces environnantes pour des conditions où l'occupant n'est pas directement exposé au rayonnement et à des mouvements d'air supérieurs à 0,2 m/s.

#### **IV-3-1-6-L'humidité relative de l'air**

L'humidité relative de l'air est le rapport exprimé en % entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à la même température. Ce facteur influence le confort du fait que les échanges thermiques ont lieu également par évaporation à la surface de la peau. Entre 30% à 70 %, l'humidité relative n'influence pratiquement pas la sensation de confort thermique [Magali, 2002].

#### **IV-3-1-7-La vitesse de l'air**

La vitesse de l'air influence la perte convective de chaleur de la part du corps. L'air à une vitesse plus élevée semblera plus froid. En augmentant la vitesse de l'air autour du corps, les pertes thermiques augmentent aussi. Dans ce cas, la tolérance à la température ambiante s'agrandit, par conséquent la sensation de confort est réelle dans les températures relativement plus hautes [Magali, 2002]. Par ailleurs, une vitesse de l'air de 1m/s se traduit par un gain en température ressenti de 3 à 4°C par rapport à un air calme [Izard, 1994].

Le fonctionnement correct de la machine humaine implique une température intérieure constante de 36,8° C environ. Cette température est le résultat de la production de chaleur interne et des conditions d'échanges de chaleur entre le corps et l'ambiance. Des mécanismes de thermorégulation entrent en jeu dès que les conditions d'ambiance tendent à modifier la température interne [Izard, 1994].

- En ambiance chaude, les échanges seront augmentés par une dilatation des vaisseaux sanguins (on devient rouge), une augmentation du flux sanguin et la sudation (l'évaporation de la sueur absorbe de la chaleur).
- En ambiance froide, les vaisseaux se contracteront (on devient blanc) et un frissonnement apparaîtra pour augmenter la production de chaleur.

Le confort est obtenu quand l'ambiance est telle que ces mécanismes peuvent solliciter.

A partir du principe “Buildings don’t use energy, people do” [Brown et al,2004], on assiste donc de plus en plus à une mouvance de la science du bâtiment vers une adaptabilité environnementale en architecture, en redonnant à l’utilisateur le moyen de modifier, d’adapter son environnement immédiat, qui considère que l’homme n’est pas passif dans son environnement intérieur mais est plutôt actif et peut poser des gestes pour s’adapter aux conditions physiques changeantes [Brager et de Dear,1998], et ce par :

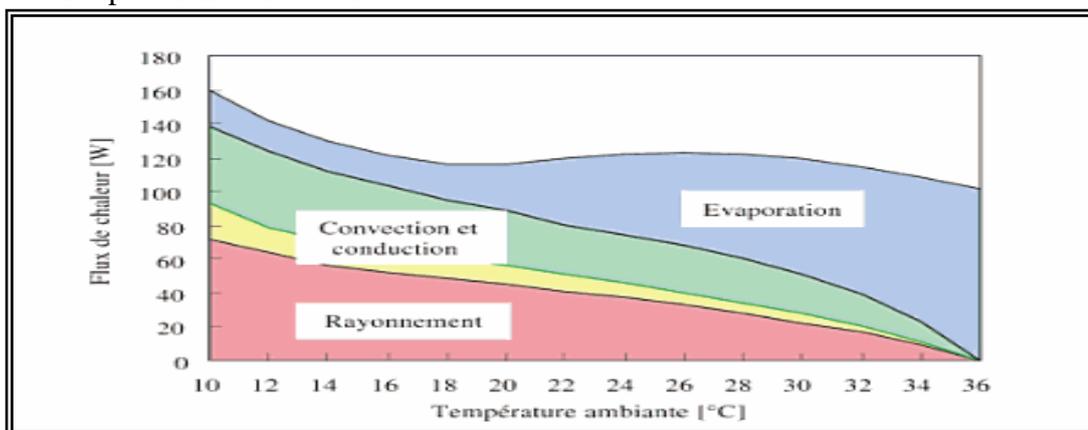
- L’ajustement des comportements (habillement, horaire et rythme de travail, ..) ;
- L’acclimatation physiologique et
- L’acceptation psychologique ou accoutumance (l’aspect cognitif et culturel de l’adaptation).

### IV-3-2-Caractérisation d’une ambiance chaude

Comment caractériser une ambiance de point de vue du confort thermique ?

Les échanges entre la surface du corps et des vêtements et l’ambiance se font suivant trois modes principaux [Izard, 1994].:

- Echange de chaleur par convection avec l’air
- Echange par rayonnement avec l’environnement (les parois, le soleil, présence de machines, d’autres personnes, ...)
- Evaporation de la sueur



**Figure IV-2** : Les échanges thermiques de l’homme avec son environnement (Source : Izard, 1994)

La sudation est corrélée à une sensation d’inconfort chaud sensible. Dans la zone de confort, la sudation est faible et l’humidité de l’air est un facteur dont l’influence est négligeable. L’appréciation d’une ambiance en été peut se faire alors principalement par la température de l’air et la température moyenne des parois (appelée température radiante

moyenne). La conception des locaux devra donc engendrer des valeurs de ces températures compatibles avec une sensation de confort satisfaisante. [Izard, 1994].

Si ce n'est pas le cas, un moyen supplémentaire s'offre à l'occupant pour améliorer son confort : il s'agit, par la création d'une certaine vitesse de l'air (soit par une ventilation traversant, soit par des ventilateurs), d'augmenter les échanges avec l'air et favoriser l'évaporation de la sueur dégagée par le corps [Izard, 1994].

Ainsi, une vitesse de l'air de 1m/s se traduit par un gain en température ressenti de 3 à 4°C par rapport à un air calme. Cependant ce moyen est d'une mise en œuvre délicate car le contrôle des vitesses d'air est difficile à réaliser dans l'ensemble d'un local. Il ne doit être considéré que comme un recours éventuel, une conception correcte des constructions permettant en général d'obtenir en air calme un confort satisfaisant. [Izard, 1994].

### **IV-3-3-Qualification globale d'une ambiance**

L'ambiance dans un espace intérieur peut être qualifiée de manière globale par une note de qualification qui dépend des paramètres cités plus haut. Le calcul de cette note prend pour point de départ les données thermiques intérieures, l'activité et la vêtue du sujet. Un bilan net est établi entre les conditions réelles intérieures et celles qui présidaient à un équilibre thermique entre le corps et son environnement [Givoni, 1994]. Des modèles théoriques, basés sur des sondages, permettent de traduire ces ambiances en termes de confort, proposée par Fanger [Fanger, 1982] et officialisée par la norme internationale ISO 7730 [ISO, 1993] :

- par le moyen du Vote Moyen Prévisible (PMV en anglais pour Predicted Mean Vote), ce PMV est coté de la manière suivante

-3= très froid

-2= froid

-1=légèrement froid

0 = neutre

+1=légèrement chaud

+2= chaud

+3= très chaud

Il existe aussi le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied). La note de qualité est le complémentaire du PPD et se déduit du PMV, selon le schéma ci après :

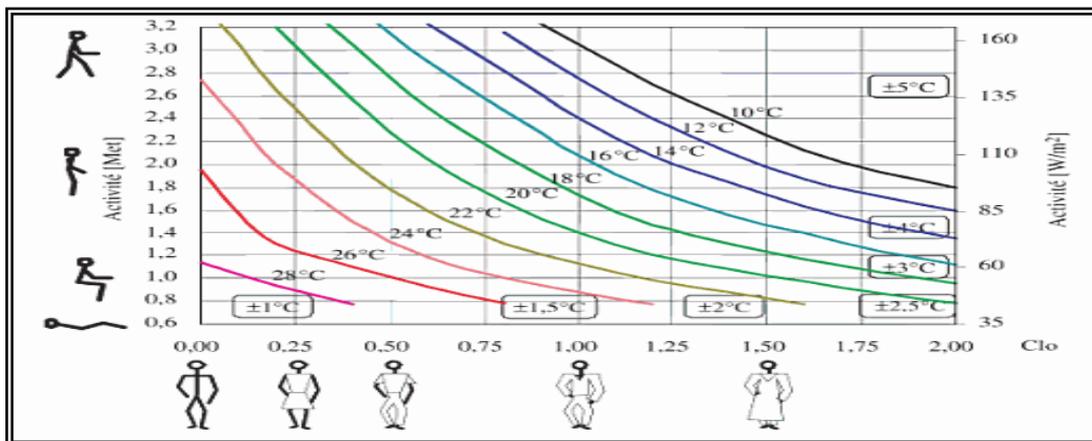


Figure IV 3 : la qualification d'une ambiance thermique  
(Source : Iazard, 1994)

#### IV- 4- Les paramètres affectant la température ambiante intérieure en été

Chaque lieu présente un climat défini par les paramètres de température, rayonnement solaire, humidité et vent, variables au cours d'un cycle annuel et évidemment du cycle jour-nuit [Châtelet et al, 1994]. D'un point de vue confort, le climat peut être agréable ou désagréable selon les moments ou les saisons. Un bâtiment construit pour abriter des personnes, constitue un milieu intermédiaire entre ses occupants et l'environnement extérieur, ayant pour but de créer un climat intérieur plus confortable que le climat extérieur, bien adapté à nos besoins et notre confort [Roulet, 2004].

Donc il s'agit de l'enveloppe du bâtiment qui sépare l'espace intérieur de l'environnement extérieur et par la même modifie ou supprime les effets directs des paramètres climatiques tels que : la température ambiante extérieure, l'humidité, le vent, le rayonnement solaire. Cette enveloppe est traditionnellement composée de deux types de matériaux : opaques et transparents, bien qu'on utilise parfois des matériaux translucides. Les matériaux influent à la fois sur la température de l'air et la température de la surface et ont ainsi un effet prépondérant sur le confort des occupants [Givoni, 1978].

##### IV-4-1-Le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est du type méditerranéen situé dans une zone de transition entre les climats tropicaux et tempérés, montrant des grands gradients climatiques et des cycles annuels forts [Hyde.2000]. Il s'étend des latitudes 36° 4 au Nord de l'équateur. En été, la région subit l'influence du vent chaud et sec du Sahara. Les températures moyennes maximales varient de 25°C à 38°C le jour et de 16°C à 30°C la nuit. L'humidité relative est élevée de 70 à 80%. Les vents locaux sont faibles, pendant les grosses chaleurs, la brise de mer joue un rôle régulateur et rafraîchissant avec une influence d'un vent du Sud – Est très chaud et sec, "le Sirocco" avec

sifflement et envoie du sable du désert jusqu'au littoral méditerranéen. En hiver, les masses d'air d'origine polaire envahissent le bassin méditerranéen. Les températures maximales diurnes atteignent 8°C à 21°C et les températures nocturnes varient de 0°C à 18°C. L'humidité relative est de 60 à 70% [Liebard et De Herde, 2005].

Les principales caractéristiques de ce climat sont les suivantes [Givoni, 1978]:

- concentration des pluies en hiver et été sec,
- été chaud à torride, hiver frais à froid,
- rayonnement solaire intense, surtout en été.

Le climat de l'Algérie est déterminé par les variations de latitudes et d'altitudes. L'ordonnement latitudinal d'éléments structuraux, l'ensemble géographique tout à fait différencié (succession parallèle de plaines littorales, bassins intérieurs, montagnes telliennes, chaînes atlasiques et espaces sahariens) correspond globalement à des zones et des sous zones climatiques très distinctes. [Mezred, 1997].

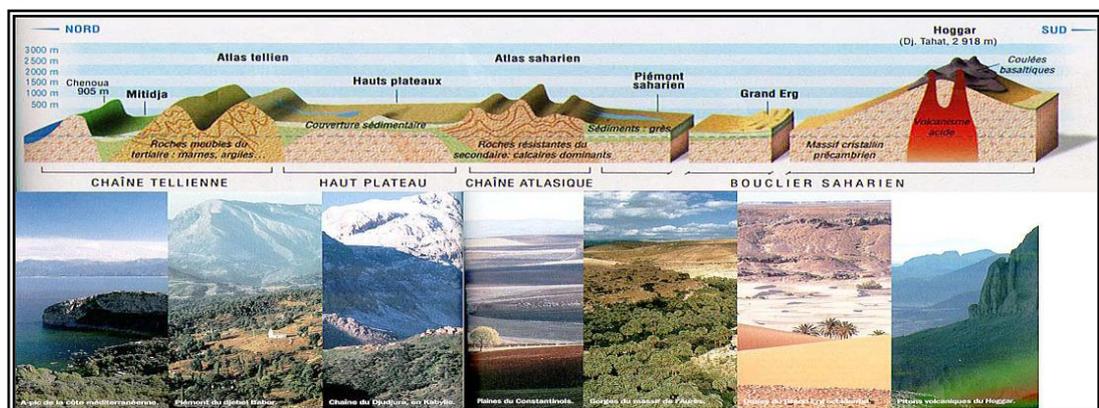


Figure IV-4 : Coupe transversale Nord-Sud du relief  
(Source : Ould Henia, 2003)

#### IV-4-1-1-Zonage climatique

La classification prenant en compte des données météorologiques représentatives des 10 dernières années permet de définir avec plus de précision les différentes zones climatiques [MHU, 1993].

Leur délimitation a été faite sur la base du calcul des degrés jours (différence entre températures extérieures moyennes et température intérieure de base de confort cumulée sur l'année).

L'élaboration des zones climatiques s'est faite par la détermination d'une température de base, 16°C pour l'hiver et 25°C pour l'été.

##### a. -Les zones climatiques d'hiver

H1, H2 et H3 définissent trois zones climatiques [Ouled Henia, 2008]:

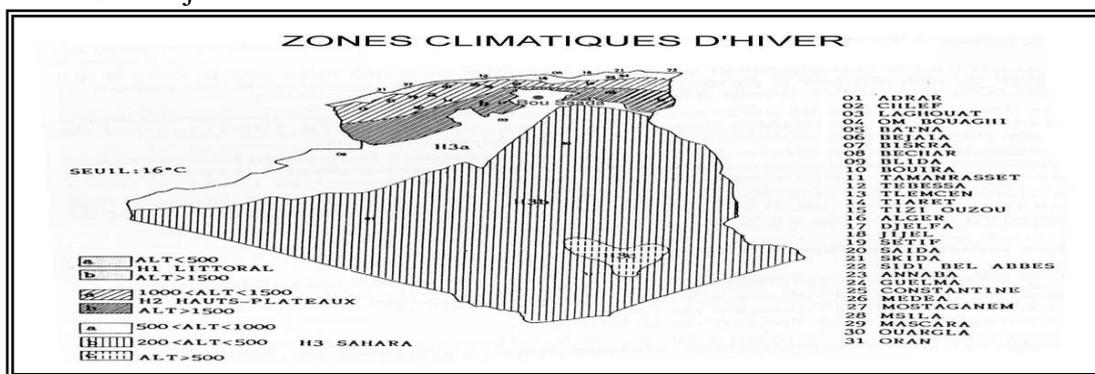
- La zone H1 subit l'influence de la mer ;
- La zone H2 subit l'influence de l'altitude ;
- La zone H3 subit l'influence de la latitude.

Si on fait intervenir l'altitude comme facteur par rapport à chaque zone, il en découle les sous zones suivantes :

- H1a : Littoral-mer Alt. < à 500 m
- H1b : Arrière littoral-montagne Alt. > à 500 m
- H2a : Atlas tellien-montagne 1000 m < Alt < 1500 m
- H2b : Atlas Saharien-montagne Alt > à 1500 m
- H3a : Présahara 500 m < Alt < 1000 m
- H3b : Sahara 200 m < Alt < 500 m
- H3c : Hoggar Alt < à 500 m

### Caractéristiques

- La zone H1a des hivers doux avec des amplitudes faibles alors que la zone H1b a des hivers plus froids et plus longs.
- La zone H2a est caractérisée par des hivers froids et un écart de température diurne important. La zone H2b a des hivers encore plus froids que la zone H2a.
- La zone H3a est remarquable par des hivers très froids la nuit par rapport au jour, ce qui rend les écarts de température très importants.
- La zone H3c a des hivers très froids analogues à la zone H3a mais qui persistent même durant la journée.



**Figure IV-5:** Zones climatiques d'Hiver  
(Source :Ould-Henia, 2003)

### b. Les zones climatiques d'été

Elles sont représentées par E1, E2, E3, E4, et E5 [Ould henia, 2003] .

- La zone E1 subit l'influence de la mer ;
- La zone E2 subit l'influence de l'altitude ;

- La zone E3, E4 et E5 subissent l'influence de la latitude.

### Caractéristiques

- La zone E1 a des étés chauds et humides. L'écart des températures diurnes est faible.
- La zone E2 a des étés plus chauds et moins humides avec des écarts de température diurne importants.
- La zone E3 a des étés très chauds et secs mais moins pénibles qu'en zone E4.
- La zone E4 a des étés plus chauds et plus secs qu'en zone E3.
- La zone E5 a des étés encore plus chauds et plus secs que les deux zones précédentes, c'est la zone la plus chaude de l'Algérie.

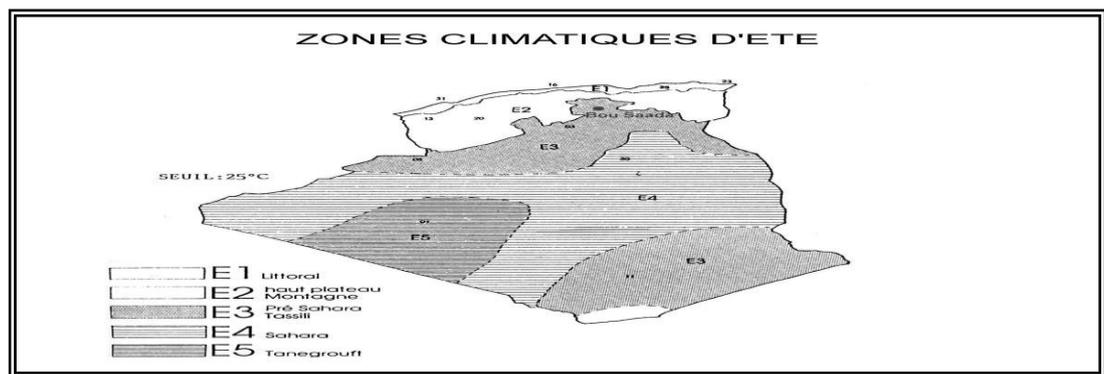


Figure IV-6: Zones climatiques d'Eté  
(Source : Ould-Henia, 2003)

## IV-4-2-L'effet des paramètres du climat la température d'une ambiance intérieure

### IV-4-2-1-Le rayonnement solaire

Le soleil est un astre incandescent qui émet un rayonnement électromagnétique sous forme de lumière et de chaleur, dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source notable d'énergie. Les caractéristiques du système solaire soumettent la terre à des variations saisonnières affectant l'évolution de l'ensoleillement et des températures [Liebard et De Herde, 2005].

Le rayonnement solaire est responsable de la surchauffe des bâtiments durant la période estivale. Dans ce contexte, pour comprendre son effet sur une ambiance, on doit prendre en compte les diverses caractéristiques du rayonnement incident [Ineichen, 2007].

#### IV-4-2-1-1- Le mouvement terre-soleil

##### a- Le mouvement de la terre autour du soleil

En vertu des lois de Kepler, le centre de gravité de la terre décrit une ellipse ayant le soleil pour foyer et située dans un plan appelé plan de l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui

est de 149 500 000 km [De Brichambaut, 1982]. La distance terre-soleil varie quotidiennement selon la relation suivante :

$$D_{ts} = 1 - 0,017 \cdot \cos \left[ \frac{360(J-2)}{365} \right] \quad [\text{De Brichambaut, 1982}]$$

Où :

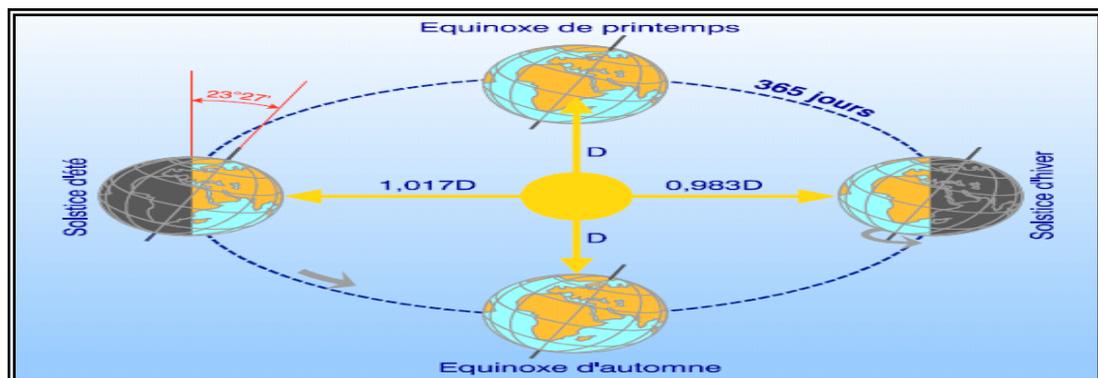
J : le numéro de jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

- année civile J= 365 jours
- année bissextile J= 366 jours

$D_{ts}(\text{min}) = 0,983 \text{ UA}$  (Unité Atmosphérique) vers le 02 janvier (périgée)

$D_{ts}(\text{max}) = 1,017 \text{ UA}$  (Unité Atmosphérique) vers le 05 juillet (apogée)

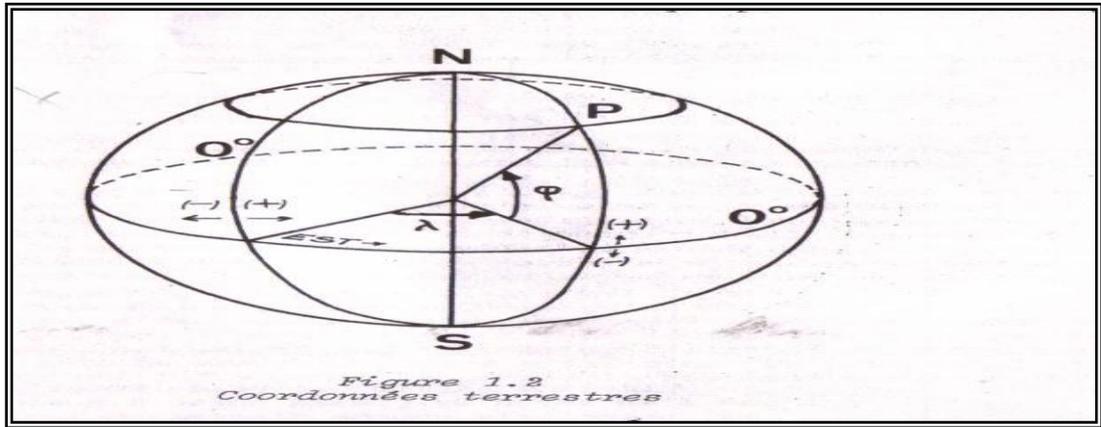
Par ailleurs, la terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à cet axe passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur est incliné de  $23^{\circ}27'$  sur le plan l'écliptique. La rotation propre de la terre a introduit la notion du jour solaire moyen, divisé de 24 heures de 60 minutes. La combinaison des mouvements de rotation de la terre autour du soleil (tour par an) et sur elle-même (tour par jour) se traduit par l'écart entre le temps sidéral et le temps solaire. Ces notions du temps, liées au cycle annuel et au cycle diurne, sont essentielles pour déterminer la position apparente du soleil dans le ciel, en fonction des données astronomiques et des coordonnées géographiques [De Brichambaut, 1982].



**Figure IV-7** : mouvement de la terre autour du soleil.  
(Source : Liebard et De Herde, 2005)

### b- Les coordonnées terrestres

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques : la longitude, la latitude et l'altitude.



**Figure IV-8 : Coordonnées terrestre**  
(Source : de Brichambaut, 1982)

- **La longitude ( $\lambda$ )** d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour le méridien d'origine  $0^\circ$  le plan passant par l'observatoire de Greenwich [De Brichambaut, 1982]. Cet angle est mesuré par l'arc de l'équateur compris entre le méridien d'origine et le méridien de ce lieu. Dans une heure sidérale, elle parcourt un arc de  $15^\circ$ . Il existe 24 méridiens séparés chacun de  $15^\circ$  ( $24 \times 15^\circ = 360^\circ$ ), donnant naissance à 24 fuseaux horaires [Bernard, 1983]. Elle permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest. Elle varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$  [De Brichambaut, 1982].
- **La latitude ( $\varphi$ )** d'un lieu correspond à l'angle de la verticale de ce lieu avec l'équateur. Cet angle est mesuré par l'arc du méridien compris entre ce lieu et l'équateur. Elle varie de 0 (l'équateur) à  $\pm 90^\circ$  (aux pôles), dont le signe + pour l'hémisphère Nord et le signe - pour l'hémisphère Sud [De Brichambaut, 1982].
- **L'altitude ( $z$ )** d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer. On l'exprime généralement en mètres [De Brichambaut, 1982].

### c- Les coordonnées du soleil

#### c<sub>1</sub>-La déclinaison du soleil $\delta$

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Si l'on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (comprise entre  $0^\circ$  et  $+90^\circ$  au pôle Nord), et négativement celles de l'hémisphère Sud et si les signes identiques sont attribués à la déclinaison  $\delta$ , on voit aussitôt que la hauteur du soleil, à midi vrai, lorsque le soleil se trouve dans le méridien du lieu est donnée par la relation :

$$\gamma_{max} = 90^\circ - \varphi + \delta \quad [\text{De Brichambaut, 1982}].$$

La hauteur du soleil est déterminée par la latitude de lieu et la déclinaison du soleil. La déclinaison du soleil varie entre ses deux valeurs extrêmes :  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$  selon la relation suivante :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin[0,986 \cdot (J - 80)] \quad [\text{De Brichambaut, 1982}].$$

La déclinaison est nulle aux moments des équinoxes :  $\gamma_{max} = 90^\circ - \varphi$  [De Brichambaut, 1982]. Le soleil se trouve directement au dessus de l'équateur et partout sur le globe les jours et les nuits sont égaux et ont une durée de 12 heures. L'équinoxe du Printemps se produit le 21 Mars, et l'équinoxe d'Automne se produit le 21 Septembre [Liebard, et De Herde, 2005].

Elle atteint ses deux valeurs extrêmes :  $-23,45^\circ$  et  $23,45^\circ$  au solstice d'Hiver (21 ou 22 Décembre (selon l'année) et au solstice d'Eté (le 21 ou le 22 Juin) [De Brichambaut, 1982].

### C<sub>2</sub>-L'angle horaire du soleil

Angle horaire du soleil ( $\omega$ ) est l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Il se rattache à la notion du temps solaire vraie TVS. Les passages du soleil au méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas exactement à 24 heures d'intervalle, et le midi vrai peut différer légèrement de 12h TSM selon l'époque de l'année [De Brichambaut, 1982]. Cet écart est dû :

en vertu de la 3ème loi de Kepler, la terre impose que son déplacement angulaire quotidien autour du soleil s'accélère et prenne de l'avance sur le déplacement angulaire annuel moyen. Ce phénomène se manifeste durant les périodes d'éloignement, du fait que la terre décrite en un an, une ellipse de faible excentricité. Il en résulte une variation saisonnière de sa vitesse angulaire autour du soleil ; celle-ci se combine avec la rotation propre de la terre et les variations de l'ensemble affectent l'heure de passage du soleil au méridien. Cet écart  $\Delta t$  entre le temps solaire moyen (TSM) au méridien d'un lieu et le temps solaire vrai (TVS) détermine la position réelle du soleil, parfois il est désigné par le terme équation du temps.

Pour un lieu de longitude  $\lambda$  donnée, il existe ainsi une relation directe entre le TVS et l'angle horaire ( $\omega$ ) du soleil :

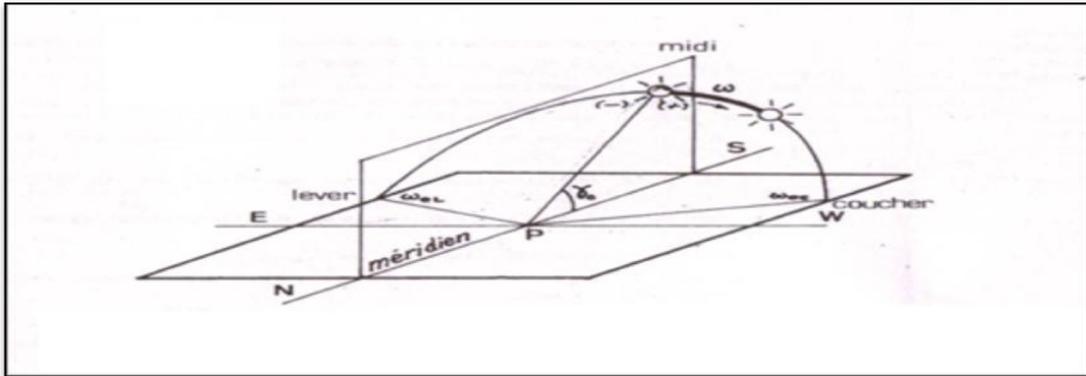
$$\omega = 15(TVS - 12)$$

$$TVS = TSM + \Delta t \text{ et}$$

$$TSM = TU + \frac{\lambda}{15}$$

On en déduit : 
$$\omega = 15 \left( TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12 \right)$$

Où :  $\omega$  est mesuré en degrés, TU et  $\Delta t$  sont exprimé en heures



**Figure IV-9** :L'angle horaire du soleil  
(Source : de Brichambaut, 1982)

#### IV-4-2-1-2-Le mouvement apparent du soleil

Le mouvement apparent du soleil est un phénomène d'observation courante, ce mouvement est déterminé par le calcul de position du soleil dans le ciel, à tout instant en fonction de sa déclinaison et du temps solaire local vrai, ainsi que par sa hauteur angulaire au-dessus de l'horizon et son azimut géographique [De Brichambaut, 1982].

##### a) La hauteur angulaire du soleil

La hauteur angulaire ( $\gamma$ ) est un angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Durant le jour, elle peut varier de  $0^\circ$  (soleil à l'horizon) à  $90^\circ$  (à l'équateur). Elle est donnée par la formule suivante [De Brichambaut, 1982].

$$\sin \gamma = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

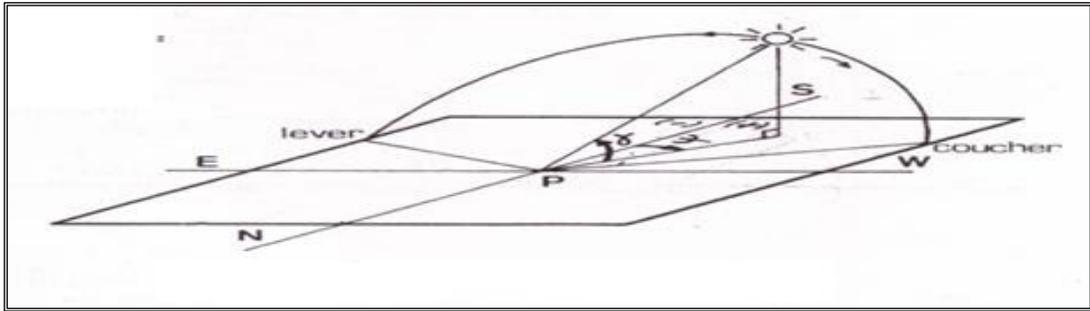
Où :

- $\varphi$  est la latitude du lieu
- $\delta$  est la déclinaison du soleil
- $\omega$  est l'angle horaire du soleil

##### b) Azimut du soleil

C'est un angle  $\psi$  compris entre le méridien de lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence du rayonnement sur une surface non horizontale. Selon les notations retenues, l'origine  $0^\circ$  des azimuts correspond à la direction sud dans l'hémisphère nord (latitudes positives) et à la direction nord dans l'hémisphère sud (latitudes négatives); les azimuts sont comptés positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. L'azimut du soleil est donné par la formule suivante [De Brichambaut, 1982]:

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \gamma}$$



**Figure IV-10** : coordonnées angulaires du soleil  
(Source : De Brichambaut, 1982)

a)

#### IV-4-2-1-3-Le calcul du rayonnement solaire hors atmosphère

L'échelle des phénomènes mettant en œuvre l'énergie solaire à la surface de la terre est donnée par la constante solaire. La valeur la plus probable actuellement retenue est de  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  ( $\pm 6 \text{ W.m}^{-2}$ ) arrondi à  $1,37 \text{ W.m}^{-2}$ . A la distance moyenne de la terre au soleil, l'angle solide sous lequel le soleil est vu de la terre est de  $0,68 \cdot 10^{-4}$  stéradians. Il en résulte un éclaircissement moyen sur une surface perpendiculaire aux rayons solaire. Elle est désignée par le symbole  $I_0$  [De Brichambaut, 1982].

Le soleil est une sphère gazeuse de  $1\,391\,000 \text{ km}$  de diamètre. Il est siège de réactions thermonucléaires par le cycle de Bethe, génératrice du rayonnement corpusculaire mais surtout du rayonnement électromagnétique qui correspond approximativement à ceux émis par un corps noir porté à une température de  $5800\text{k}$  environ [De Brichambaut, 1982]. Son émittance énergétique (flux d'énergie par unité de surface pour l'ensemble du spectre) est fonction de la température, et donnée par la loi de Stefan Boltzman :  $M^0 = \sigma \cdot T^4$

Avec  $M^0$  est exprimé en  $\text{W.m}^{-2}$ ,  $T$  en  $\text{K}$ ,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

L'énergie rayonnée par le soleil est indépendante de la direction, et suit la loi de Lambert. Ainsi, elle n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde, elle est donnée par la loi de Planck:

$$M_{\lambda}^0 = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1}$$

Où :

$M_{\lambda}^0$  Est l'émittance monochromatique en  $\text{W/m}^3$ ,  $C_1=3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$  et  $C_2=14\,388 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$

De plus, la loi de Wien exprime le déplacement de l'abscisse  $\lambda_m$  du maximum de la  $M_\lambda^0$  quand la température varie :

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \text{ avec } \lambda_m \text{ en } \mu\text{m} \text{ et } T \text{ en } K.$$

Le rayonnement électromagnétique couvre toutes les longueurs d'onde, depuis les rayons x et  $\gamma$  jusqu'à l'infrarouge lointain, 98% d'énergie de ce rayonnement est comprise entre  $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ , le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle. La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- Pour  $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 0,4\mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour  $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8\mu\text{m}$  : c'est le domaine du visible, il représente 47,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour  $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.

Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température  $T = 5800K$  dans l'intervalle du spectre  $[0,25 \mu\text{m} \rightarrow 4\mu\text{m}]$ .

#### IV-4-2-1-4-L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

##### a) La composition de l'atmosphère

L'atmosphère est constituée par :

**La troposphère** : depuis le sol jusqu'à 10 à 15 km d'altitude (la limite supérieure la tropopause), où la température décroît régulièrement de  $6,5^\circ\text{C}$  par kilomètre, pour atteindre  $-50^\circ$  à  $-90^\circ$  à la base de la couche immédiatement supérieure qui est **la stratosphère**, elle-même surmontait par **ionosphère** [Bernard, 1983].

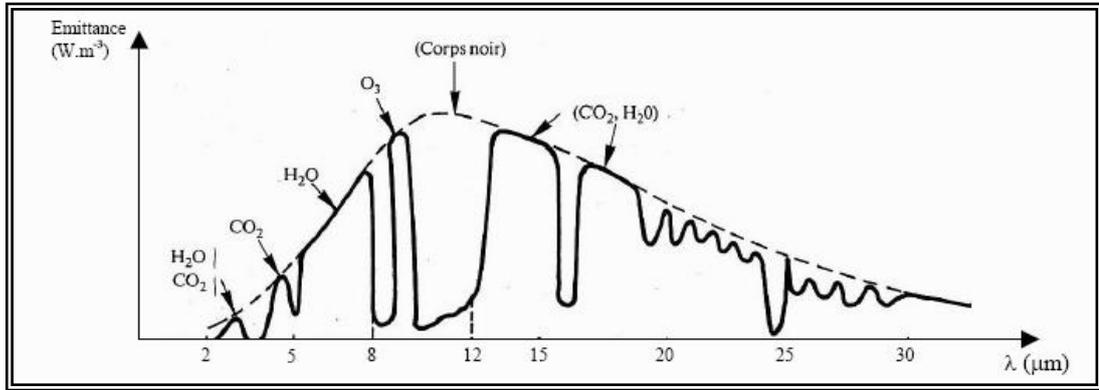
##### b) La notion de la masse atmosphérique

La masse atmosphérique unité, est la masse atmosphérique pour la direction du zénith, la masse atmosphérique unité en  $\text{kg.m}^2$ . Elle est définie en prenant pour unité l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne au dessus du niveau de la mer (pression 1000 mb, épaisseur réduite à 8 km, dans les conditions normales de température et de pression). Elle est fonction de la hauteur du soleil  $\gamma$  et de l'altitude  $z$  [De Brichambaut, 1982].

$$m = \frac{1}{\sin \gamma} \cdot (1 - 0,1 z)$$

### c) L'absorption atmosphérique

L'atmosphère gazeuse est composée principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%), mais aussi de composés divers possédants éventuellement des bandes d'absorption dans le domaine des longueurs d'ondes solaire : gaz carbonique, oxyde d'azote, gaz rares, ozone, vapeur d'eau, ect [De Brichambaut, 1982].



**Figure IV-11** : Absorption atmosphérique du rayonnement solaire  
(Source : de Brichambaut, 1982)

Les rayons X et UV ( $\lambda < 0,18 \mu\text{m}$ ) sont totalement absorbés au dessus de 60km. L'ultraviolet moyen ( $0,18 \mu\text{m} < \lambda < 0,29 \mu\text{m}$ ) est absorbé entièrement par le O<sub>2</sub> ou le O<sub>3</sub> et l'ultraviolet proche ( $0,29 \mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ) il se situe essentiellement entre 10 et 50km. L'absorption décroît lorsque  $\lambda$  augmente. Le visible est relativement peu absorbé ( $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ ). Enfin, l'infrarouge est absorbé par CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> de la troposphère.

Les principales bandes d'absorption des constituants atmosphérique, dont  $\alpha$  est le facteur intégral d'absorption :

- L'ozone : forte absorption pour les longueurs d'ondes inférieure à 0,3  $\mu\text{m}$ , faible entre 0,5 et 0,7  $\mu\text{m}$ . Dont  $\alpha_{(O_3)} = 0,015 + 0,0024 \cdot \varepsilon$  ( $\varepsilon$  épaisseur réduite d'ozone comprise entre 2 et 5mm).
- La vapeur d'eau : elle est concentrée surtout au voisinage du sol. La couche de 0-5000 m contient 95% de la vapeur qui existe en totalité dans l'atmosphère, la couche 0-2000 m en contient déjà 50%. Au dessus de 20 km, la teneur de l'air en vapeur d'eau extrêmement faible bien qu'il existe des nuages dont celle-ci a totalement disparu au delà de 70km. On appelle la hauteur condensable ( $w$ ), la hauteur d'eau que l'on recueillerait par  $\text{cm}^2$  de surface horizontale du sol. Elle est fournie par la formule de HAHN :  $w (\text{g.cm}^{-2}) = 0,17 \cdot e$ . Dont,  $e$  : tension de la vapeur d'eau au sol multiplié par le  $1/\sin h$  pour tenir compte de la hauteur du soleil. Cette vapeur présente des bandes

multiples et complexes d'absorption situées à des longueurs d'ondes supérieures à 0,65  $\mu\text{m}$ .

- On appelle  $\alpha$  le facteur d'absorption intégral défini comme suit :

$$\alpha_{(H_2O)} = 0,01 + 0,03 \cdot \ln(w) + 0,002 \cdot [\ln(w)]^2$$

- L'oxygène : a des bandes étroites vers 0,69 et 0,76  $\mu\text{m}$ .
- Le dioxyde du carbone : a des bandes étroites vers 1,6 et 2  $\mu\text{m}$  et des bandes fortes bien marquées, centrées sur 2,25 et 4,15. En tenant compte de l'absorption supplémentaire due à l'absorption moléculaire  $O_2$  et au gaz carbonique  $CO_2$  selon la formule suivante :

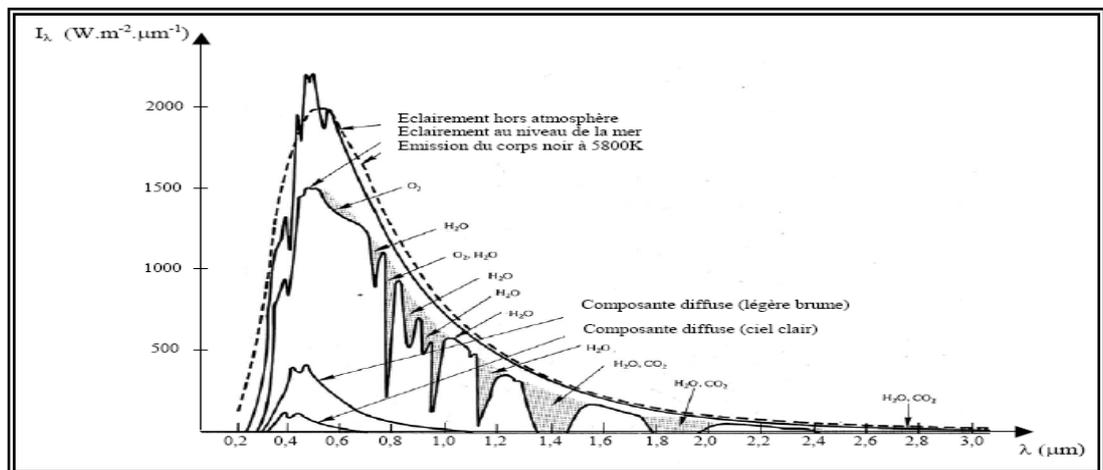
$$\alpha_{(H_2O, O_2, CO_2)} = 0,113 + 0,0285 \cdot \ln(w) + 0,002 \cdot [\ln(w)]^2$$

L'atmosphère contient aussi des poussières, particules d'origine volcanique, ou industrielle, dont les propriétés d'absorption sont très variables [De Brichambaut, 1982].

#### d) La diffusion atmosphérique

Outre l'absorption sélective liée aux gaz atmosphériques, le rayonnement solaire est soumis à la diffusion, lors de sa traversée de l'atmosphère. Il s'agit d'une redistribution spatiale du rayonnement par des particules matérielles : molécules, aérosols,...

Ce phénomène est complexe puisqu'il intègre à la fois la diffraction, la réfraction, et la réflexion par les particules. L'indice de réfraction des particules diffusantes, mais aussi et surtout leur dimension par rapport aux longueurs d'onde considérées, modifient très sensiblement la répartition et l'intensité de la lumière diffusée, et donc l'extinction du rayonnement [De Brichambaut, 1982].



**Figure IV-12:** le diagramme d'extinction atmosphérique  
(Source : de Brichambaut, 1982)

### d<sub>1</sub>) Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire est proportionnelle à l'inverse de la puissance quatrième de la longueur d'onde. Cette loi de dépendance implique une plus forte extinction du rayonnement direct dans les courtes longueurs d'onde (bleu) que dans les grandes longueurs d'onde (rouge) du spectre visible. Elle se manifeste par une coloration jaune, puis orangée, puis rouge du disque solaire lorsque le trajet optique des rayons augmente, en particulier lorsque le soleil s'approche de l'horizon. Elle détermine également la couleur bleue foncée de la lumière diffusée par le ciel pur. [De Brichambaut, 1982].

Si l'on désigne par  $\delta_{R,\lambda}$  la densité optique d'une masse d'air unité pour la diffusion Rayleigh à la longueur d'onde  $\lambda$ , on a approximativement :

$$\delta_{R,\lambda} \approx \lambda^{-4,05}$$

Et

$$\tau_{R,\lambda} = e^{-\delta_{R,\lambda}}$$

Avec un coefficient d'extinction

$$k = \frac{32 \cdot \pi^3}{3N} \cdot (n - 1)^2 \cdot \frac{1}{\lambda^4}$$

Où

N : le nombre des molécules par unité de volume

n : l'indice de réfraction du gaz

### d<sub>2</sub>) Diffusion par aérosols

La quantité d'aérosols rencontrée par le rayonnement est un élément déterminant de l'extinction (absorption ou diffusion) qui leur est liée. Selon les résultats d'Angström, on obtient pour la densité optique de diffusion par les aérosols [De Brichambaut, 1982].

$$\delta_{A,\lambda} = \beta_A \cdot \lambda^{-13}$$

### d<sub>3</sub>) Diffusion par les nuages

La diffusion par les nuages est indépendante de la longueur d'onde et provient de l'ensemble des phénomènes de réfraction, de diffraction et de réflexion.

La nébulosité est le paramètre météorologique qui permet d'estimer l'importance prise par les nuages dans le phénomène de réflexion, diffusion et absorption à leur traversée par le

rayonnement solaire, elle peut être partielle ou totale [Christian Perrin de Brichambaut, 1982]. La nébulosité totale correspond à la fraction du ciel occulté par les nuages. Elle s'exprime soit en cotas (huitièmes du ciel couvert. Le ciel clair correspond à la nébulosité 0, alors que le ciel couvert correspond à une nébulosité totale de 8 cotas (8/8) ou 10/10eme [Alain Liebard, André de Herde, 2005].

### e) Le trouble atmosphérique

Le facteur de trouble atmosphérique total  $T_L$  correspondant à la masse atmosphérique unité peut ainsi être considéré comme caractéristique des phénomènes d'absorption et de diffusion atmosphérique  $s$  et se déduit de la connaissance des divers paramètres qui les engendre, principalement de la hauteur d'eau condensable et des aérosols, caractérisé par le coefficient de trouble d'Angström  $\beta_A$  [De Brichambaut, 1982].

En effet, l'expérience a montré qu'en avait, à un moment donné la relation :

$$T_L = 2,5 + 16 \cdot \beta_A + 0,5 \cdot \ln(w)$$

Ainsi en valeur moyenne, dans les cas les plus courants de beau temps et de ciel bleu, pour la zone de Tizi Ouzou (notre cas d'étude),  $T_L$  est de l'ordre de 3,5 en hiver et de 4 en été, cette valeur correspond à la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère qui proviendrait du barrage Takssebt. Le facteur de trouble total de Linke dépend quelque peu de l'altitude  $z$  et la hauteur du soleil.

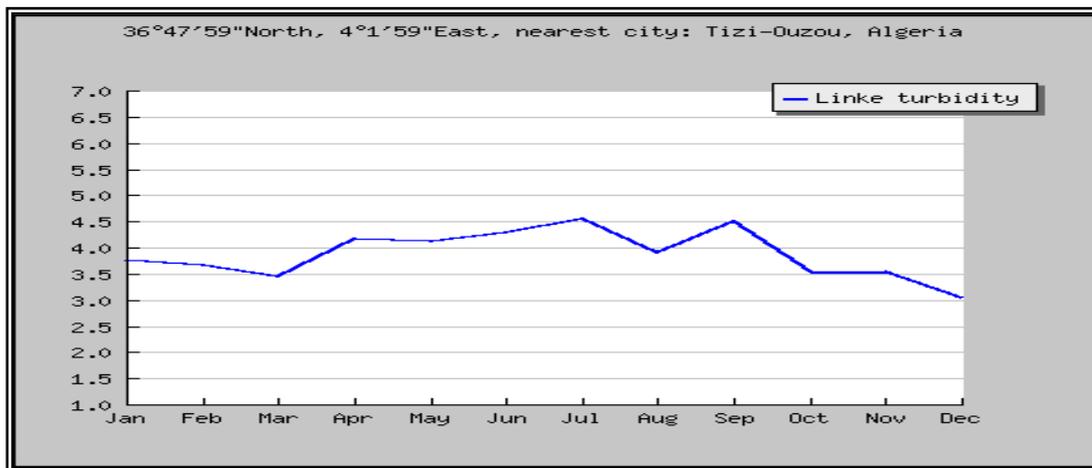


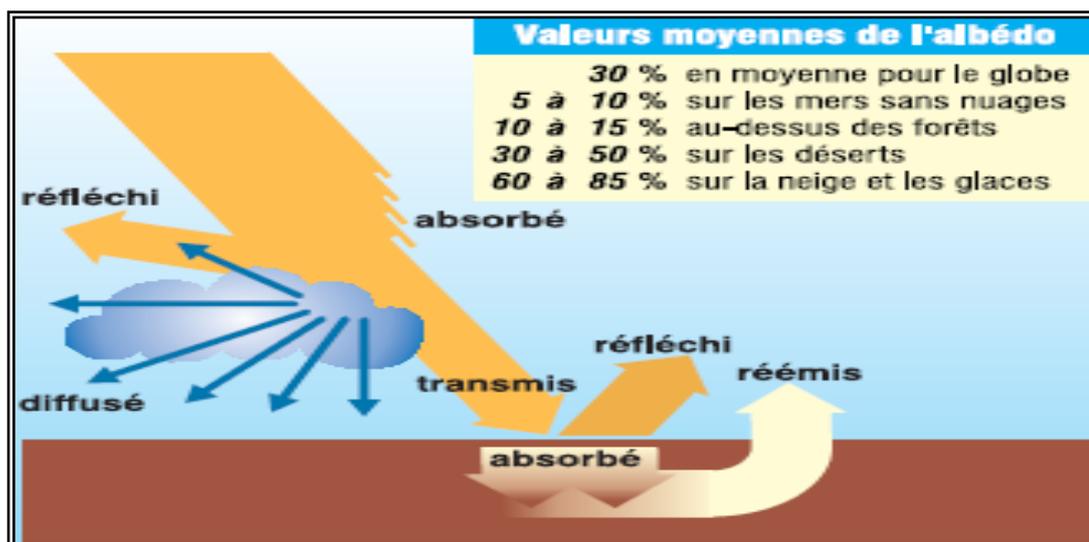
Figure IV-13 : Le trouble atmosphérique pour Tizi Ouzou  
(Source : [www.iamest.jrc.it](http://www.iamest.jrc.it))

#### IV-4-2-1-5-Le calcul du rayonnement solaire global reçu par une surface

Le rayonnement solaire globale qui atteint les parois d'un bâtiment est la somme de :

- du rayonnement direct issu du soleil
- du rayonnement diffusé par le ciel et les nuages

- du rayonnement réfléchi par l'environnement



**Figure IV-14** : Bilan radiatif terrestre  
(Source : Liebard et de Herde, 2005)

#### - Le rayonnement direct

On appelle **rayonnement solaire direct** celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Il s'éloigne de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère.

#### - Le rayonnement solaire diffus

C'est la partie dirigée vers le sol du rayonnement solaire diffusé par les molécules, aérosols et nuages. Par exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh en  $\lambda^{-4}$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés).

#### - Le rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement n'est pas entièrement absorbé par le sol dont les différentes couleurs indiquent des réflexions sélectives et diffuses. Le rayonnement réfléchi dépend en particulier de la nature du sol. On appelle albédo<sup>1</sup>  $\bar{\rho}$  la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux. Pour un corps noir l'albédo est nul. Sa valeur habituellement retenue est de [De Brichambaut, 1982] :

<sup>1</sup> Albédo = (du latin « blancheur ») un terme qui a été introduit au 19ème siècle par l'astronome américain George Philipps Bond (1825/1865) dans l'étude des planètes, et correspond au rapport du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement solaire reçu sans tenir compte de la surface réelle de l'objet. On l'utilise dans les études solaires pour caractériser la réflexion d'une surface. [Bozonnet, 2005]

- 0,90 pour la neige fraîche
- 0,60 pour la neige tassée
- 0,2 pour un sol cultivé
- 0,3 à 0,4, pour le sable
- 0,05 à 0,18, eau calme selon la saison et la latitude
- 0,03 à 0,08 forêts sombres, champs verdoyants
- 0,08- à 0,15 bâtiment, sable humide, rochers

Le rayonnement réfléchi diffus repart vers l'atmosphère qui le rediffuse de nouveau partiellement vers le sol. Pour une nébulosité moyenne, la rétro diffusion atteint 10%. L'influence de l'albédo du sol est notable, par ciel clair, dans le cas de surfaces réceptrices inclinées, et surtout verticales. Elle est également sensible surtout par ciel couvert. Ces calculs seront directement appliqués pour le cas de la ville de Tizi Ouzou, pour lequel s'inscrit notre étude.

### a) Le calcul du rayonnement global reçu par une surface horizontale

#### - Le rayonnement direct

La composante du rayonnement direct sur une surface horizontale est donnée la formule suivante [De Brichambaut, 1982].

$$B'_1 = I'_1 \cdot \sin \gamma$$

Avec :

$$I'_1 = I'_0 \cdot \exp \left[ \frac{-mT_L}{0,9m + 9,4} \right]$$

$$m = \frac{1}{\sin \gamma} (1 - 0,1 z)$$

$I'_0$  : La constante solaire d'ordre de :  $1367 \text{ W.m}^{-2}$

$\Gamma$  est exprimé en degré et  $I'_1$  en  $\text{W.m}^2$ .

Cette valeur nous permet d'évaluer l'éclairement (énergie reçu) d'une surface. Elle dépend de la latitude de lieu, la déclinaison du soleil ainsi que les conditions de trouble. Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_1 = B_0 \cdot \exp \left[ \frac{-T_L}{7,5} \cdot \cos^{-0,75} (\varphi - \delta) \right]$$

Dont :

$$B'_0 = I'_0 \cdot \cos(\theta)$$

Avec  $\theta$  angle d'incidence du rayonnement solaire

$$\cos \theta = \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos(\psi - \alpha) + \sin \gamma \cdot \cos \beta$$

Dans le cas d'une surface horizontale, on a :  $\cos(\theta) = \sin \gamma$

Les valeurs quotidiennes d'irradiation peuvent être obtenues par intégration entre le lever et le coucher du soleil. Elles nous permettent par ailleurs, d'apprécier l'évolution diurne des éclairagements dans des conditions météorologiques de trouble et de nébulosité bien définies.

Elles sont données par la formule suivante :

$$B_0(\theta, \alpha) = B_0 = \frac{24}{\pi} I'_0 \cdot \int_0^{\omega} (\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \cdot d\omega$$

Soit :

$$B_0 = \frac{24}{\pi} I'_0 \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot \omega_0 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \sin \omega_0 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta \right]$$

$\varphi$  : la latitude de lieu

$\alpha$  : angle entre l'axe est/ouest et l'axe longitudinal du repère considéré

$\delta$ : déclinaison solaire (rad)

### - Le rayonnement diffus du ciel

#### -Le cas de ciel clair

Lorsque le ciel est sans nuage, la voûte céleste n'a pas une luminance uniforme. On utilise des formules empiriques, décrivant les effets de la diffusion par les molécules et les aérosols.

Le rayonnement diffus est donné par la formule suivante [De Brichambaut, 1982] :

$$D'_1 = \frac{I'_0}{25} \cdot \sqrt{\sin \gamma} \cdot (T_L - 0,5 - \sqrt{\sin \gamma})$$

$$D'_1 = 87 \cdot \sin \gamma^{0,4}, \text{ pour un ciel très pur ;}$$

$$D'_1 = 125 \cdot \sin \gamma^{0,4}, \text{ pour un ciel moyen ;}$$

$$D'_1 = 187 \cdot \sin \gamma^{0,4}, \text{ pour un ciel pollué.}$$

L'irradiation est donnée par la formule suivante

$$D_1 = B_0 \cdot \frac{T_L}{31,6} \cdot \cos(\varphi - \delta)^{-0,5}$$

La méthode proposée par PERIN BRICHAMBAUT consiste à évaluer l'énergie quotidienne provenant de rayonnement global qui est égal à la somme des rayonnements direct et diffus dans les conditions de ciel clair.

### **-Cas de ciel couvert :**

Il s'agit ici d'un ciel gris, totalement couvert de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement ne se compose que du rayonnement diffus. Si la couverture nuageuse est homogène, on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope (de même que le rayonnement diffus du sol).

Pour une surface horizontale, avec un albédo moyen (0,2) du sol environnant à faible altitude, on a [De Brichambaut, 1982] :

$$D'_2 = K \cdot G'_1 (1 + 0,3 \cdot \sin \gamma)$$

Avec

$$G'_1 = B'_1 + D'_1$$

Dont :

K : coefficient dépend de l'état du ciel avant d'être couvert par les nuages ;

K = 0,6 pour un ciel bleu foncé ;

K = 0,3 pour un ciel clair ;

K = 0,15 pour un ciel laiteux ;

On peut déduire que le rayonnement global incident sur une surface horizontale est la somme des rayonnements direct et diffus parvenant à cette surface, on a :

$$G'_1 = B'_1 + D'_1, \text{ pour un ciel clair,}$$

$$G'_2 = D'_2, \text{ pour un ciel couvert.}$$

L'évaluation du gisement énergétique solaire reçu par une surface horizontale au niveau de la ville de Tizi Ouzou (latitude : 36°4, 7'55 ) pendant la période chaude ( Août) dépend des paramètres météorologiques utiles (la durée d'ensoleillement, la nébulosité, la visibilité ,évaluation de trouble), la tension de vapeur d'eau, le trouble atmosphérique résultant, l'albédo du sol.

Il convient de tenir compte des valeurs quotidiennes qui nous permettront de déterminer la valeur moyenne mensuelle, les valeurs extrêmes, le nombre de jours de ciel clair et de ciel couvert.

Pour une journée typique du mois d'Août, dans les conditions de ciel clair, le rayonnement incident sur une surface horizontale est le plus important ( $950 \text{ W.m}^{-2}$  à 12h00).

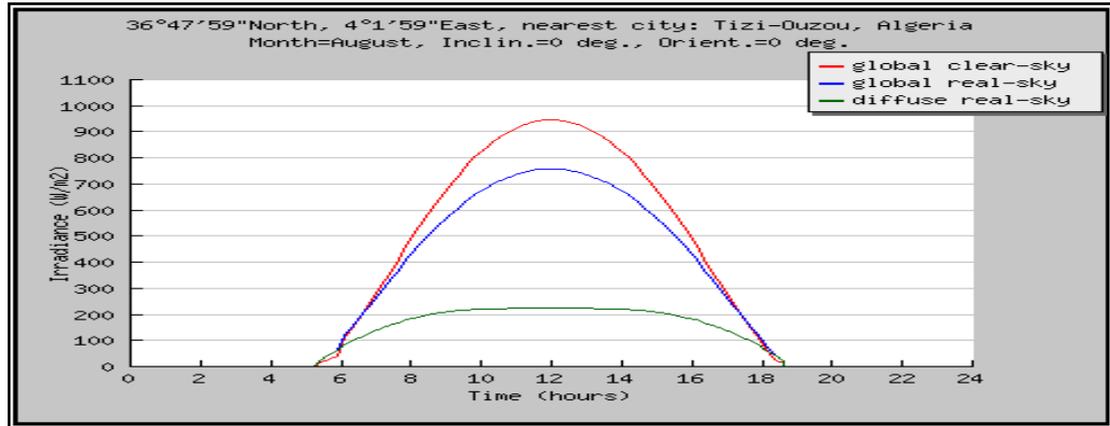


Figure IV-15: rayonnement solaire global reçu par une surface horizontale  
(Source : www. iamest.jrc.it)

### b) Le calcul du rayonnement global reçu par une surface verticale

Le passage d'un plan horizontal à un plan d'orientation quelconque nécessite la détermination de la position du soleil par rapport à la surface. Le rayonnement reçu par une surface verticale dépend de l'orientation et de coefficient de réflexion de l'environnement (albédo). [De Brichambaut, 1982].

#### - Le rayonnement direct

L'intensité du rayonnement direct incident sur une surface verticale est donnée par la formule :  $B'_1(\beta, \alpha) = I_1 \cdot \cos(\theta)$

Cet angle peut s'exprimer à l'aide de relations de trigonométrie sphérique en fonction de la position géographique (latitude et longitude), de la position du soleil dans le ciel (azimute, angle zénithal et angle horaire) et de la position de la surface [oke,1987].

On a :

$$B'_1(\beta, \alpha) = I'_0 \exp\left[\frac{-mT_L}{0,9M + 9,4}\right] \cdot \cos \theta$$

Avec :

$$m = \frac{1}{\sin \gamma} (1 - 0,1 z)$$

$$\cos \theta = \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos(\psi - \alpha) + \sin \gamma \cdot \cos \beta$$

L'angle d'incidence  $\theta$  est donné par la relation suivante dans laquelle  $\beta$  est l'inclinaison de la surface par rapport au plan horizontal et  $\alpha$  son azimut.

**- Le rayonnement diffus**

**- Cas du ciel clair**

Le rayonnement diffus reçu par une surface vertical en provenance du ciel tant que du sol est estimer par :

**- Diffus du ciel**

$$D'_{1,\alpha}(\beta, \alpha) = \frac{D'_1}{1 + \sin \gamma} \cdot \left[ \cos^2 \frac{\beta}{2} + \cos \theta \right]$$

Avec :

$$D'_1 = \frac{I'_0}{25} \cdot \sqrt{\sin \gamma} \cdot (T_L - 0,5 - \sqrt{\sin \gamma})$$

**- Diffus du sol :**

$$D'_g(\beta, \alpha) = \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

$$G'_1(\beta, \alpha) = B'_1(\beta, \alpha) + D'_{1,\alpha}(\beta, \alpha) + D'_g(\beta, \alpha)$$

$$G'_1(\beta, \alpha) = B'_1(\beta, \alpha) + D'_{1,\alpha}(\beta, \alpha) + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

**- Condition du ciel couvert**

Le rayonnement global  $G'_2$  ne se compose que du rayonnement diffus

$$D'_2(\beta, \alpha) = K \cdot G'_1(1 + 0,3 \sin \gamma)$$

D'où

$$G'_1 = B'_1 + D'_1$$

$$G'_2 = (1270 - 56 \cdot T_L) \cdot (\sin \gamma)^{\frac{T_L + 36}{33}}$$

Dont

$$G'_2(\beta, \alpha) = D'_2(\beta, \alpha) = D'_2 \cdot \left( \cos^2 \frac{\beta}{2} + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2} \right)$$

**b1) Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers l'Est**

En application des formules précédentes, on peut calculer le rayonnement global incident sur une façade orientée vers l'Est. Sa valeur est donnée en fonction de condition du ciel. Pour le cas de Tizi Ouzou, évaluation de l'énergie incidente en été (août) est donnée par :

**- Dans les conditions du ciel clair**

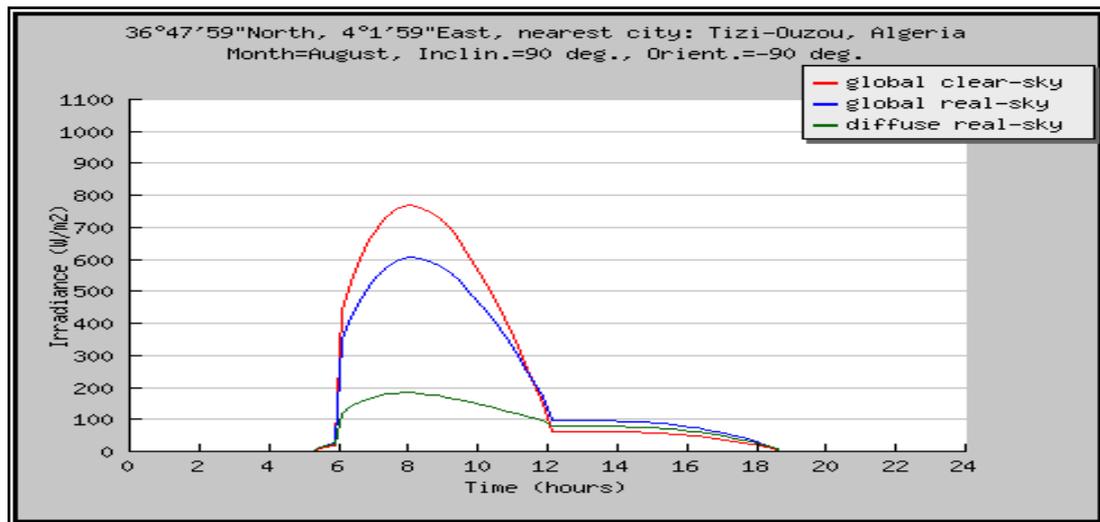
$$G'_1(90,-90) = B'_1(90,-90) = D'_{1,\alpha}(90,-90) + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)$$

En été et dans les conditions de ciel clair, le rayonnement incident sur surface verticale orienté vers l'est situé dans la ville de Tizi Ouzou atteint une valeur maximale à 8h00 qui atteint 745 w.m<sup>-2</sup>.

**-Dans les conditions du ciel couvert**

$$D'_2(90,-90) = K \cdot G'_1(1 + 0,3 \sin \gamma)$$

Dans les conditions de ciel couvert, elle reçoit un rayonnement maximal d'une valeur de 578 W.m<sup>-2</sup> à 8h00.



**Figure IV-16** : rayonnement solaire global reçu par une façade orienté vers l'Est  
(Source : www. iamest.jrc.it)

**b<sub>2</sub>) Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers l'Ouest**

En application des formules précédentes, on peut calculer le rayonnement global incident sur une façade orientée vers l'Ouest. Sa valeur est donnée en fonction de condition du ciel. Pour le cas de Tizi Ouzou, évaluation de l'énergie incidente en été (août) est donnée par :

**- Dans les conditions du ciel clair**

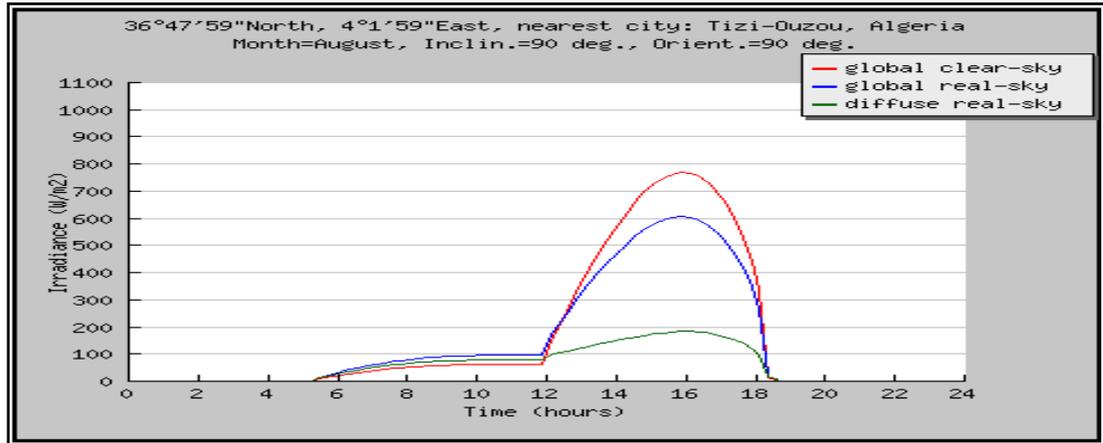
$$G'_1(90,90) = B'_1(90,90) = D'_{1,\alpha}(90,90) + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)$$

Le rayonnement incident sur surface verticale orienté vers le l'Ouest située dans la ville de Tizi Ouzou reçoit une valeur maximale à 16h00 qui atteint 769 W.m<sup>-2</sup>.

**- Dans les conditions du ciel couvert**

$$G'_2(90,90) = D'_2(90,90) = D'_2 \left( \cos^2\left(\frac{90}{2}\right) + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2}\right) \right)$$

Le rayonnement incident sur une surface orienté vers l'Ouest reçoit un rayonnement d'une valeur maximale à 12h00 qui atteint  $607 \text{ w.m}^{-2}$ .



**Figure IV-17 :** Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers l'Ouest  
(Source : [www.iamest.jrc.it](http://www.iamest.jrc.it))

### b<sub>3</sub>) Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers le Sud

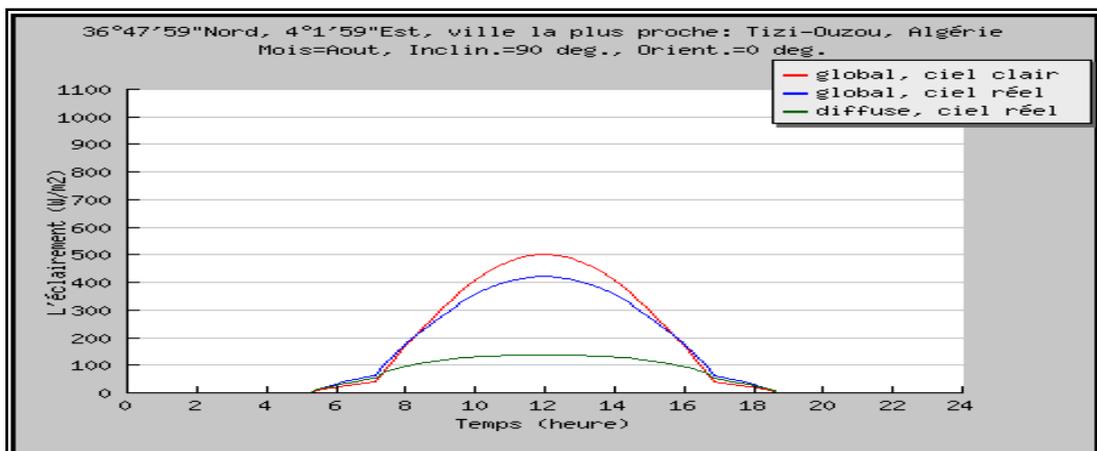
En application des formules précédentes, on peut calculer le rayonnement global incident sur une façade orientée vers le sud. Sa valeur est donnée en fonction de condition du ciel. Pour le cas de Tizi Ouzou, évaluation de l'énergie incidente en été (Août) est donnée par :

- Dans les conditions du ciel clair

$$G'_1(90,0) = B'_1(90,0) = D'_{1,\alpha}(90,0) + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)$$

- Dans les conditions du ciel couvert

$$G'_1(90,0) = D'_2(90,0) = D'_2 \cdot \cos^2\frac{90}{2} + \bar{\rho} \cdot G \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)$$



**Figure IV-18:** Le rayonnement global reçu par une façade orientée vers le Sud

(Source : [www.iamest.jrc.it](http://www.iamest.jrc.it))

En été et dans les conditions de ciel clair, le rayonnement incident sur surface verticale orienté vers le Sud située dans la ville de Tizi Ouzou est :

- Pour une journée typique du mois d’Août, le rayonnement incident sur une surface verticale orientée vers le sud une valeur maximale à 12h00 qui atteint  $501 \text{ W.m}^{-2}$ .

En été et dans les conditions de ciel couvert, la façade orientée vert le sud reçoit :

- Pour une journée typique du mois d’Août, le rayonnement incident sur une surface une valeur maximale à 12h00 qui atteint  $421 \text{ W.m}^{-2}$ .

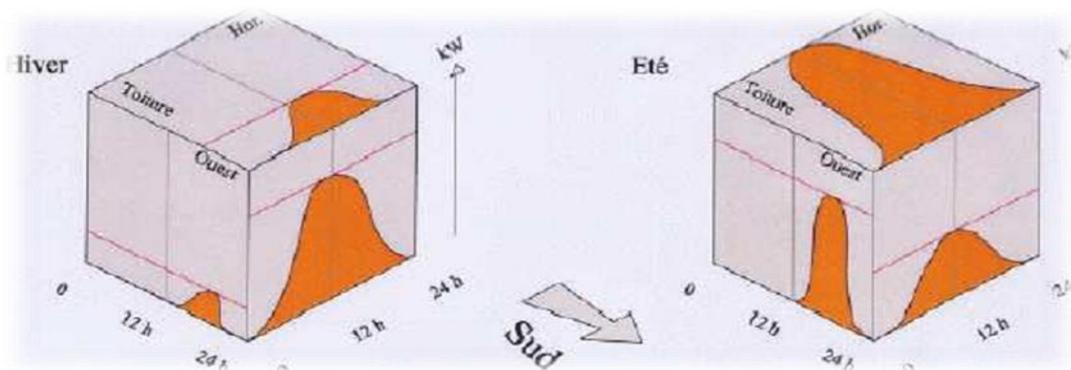
On peut constater que les densités du flux solaire atteignant un plan vertical sont très faibles au Sud et important pour l’Et et l’Ouest. Le plan horizontal reçoit la partie la plus importante du rayonnement. La surface réceptrice d’épaisseur  $e$  reçoit un rayonnement  $G$ , dans le cas le plus général, on peut observer. :

- une réflexion de la surface  $S$  de telle sorte le flux réfléchi est  $G_r$
- une transmission à travers l’épaisseur  $e$  de telle sorte que le flux transmis est  $G_t$
- une absorption dans l’épaisseur  $e$  de telle sorte que le flux absorbé est  $G_a$
- Le rayonnement incident est affecté d’un facteur de transmission

On définit les trois rapports suivants :

- Le facteur d’absorption  $\alpha = \frac{G_a}{G}$
- Le facteur de réflexion ou de réflectance  $\rho = \frac{G_r}{G}$
- Le facteur de transmission ou de transmittivité ou de transmittance  $\tau = \frac{G_t}{G}$

Donc  $G = G_r + G_a + G_t$  et  $\alpha + \rho + \tau = 1$  (corps noir)



**Figure IV-19:** Répartition des puissances reçues du soleil suivant les orientations Des façades en été.(Source : CERTU, 2003)

### c) La représentation graphique de la course apparente du soleil

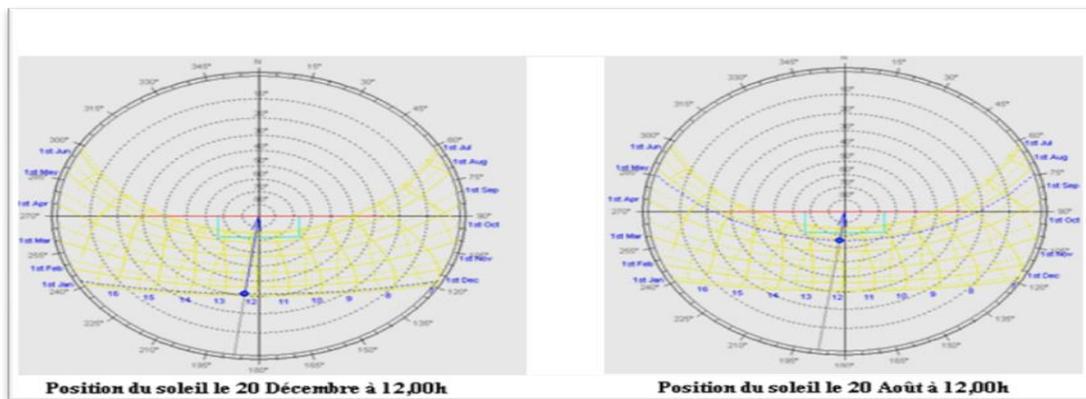
Pour bien comprendre l’influence du soleil sur une surface, il faut bien connaître à tout instant la position du soleil dans le ciel. Pour ce faire, on peut se servir du diagramme solaire. Le diagramme solaire est une représentation plane en coordonnées locales de la trajectoire du soleil, perçu depuis un point de la surface terrestre.

### c<sub>1</sub>) La projection stéréographique sur un plan horizontal

Elle consiste à reporter la trajectoire du soleil sur la sphère céleste, sur le quel sont représentés l'azimute par des rayons issus du centre du diagramme et la hauteur du soleil par les cercles concentrique. Un réseau de courbes représente la trajectoire du soleil pour différentes journées (vingtième jour de chaque mois). Ce réseau est limité par les courbes relatives aux solstices d'hiver et d'été :

- : L'enselement (durée d'insolation) des façades des bâtiments;
- Le bilan énergétique annuel;
- L'effet du masque dû à un obstacle.

La figure ci-dessous représente la projection stéréographique de la course du soleil pour la ville de Tizi Ouzou.



**Figure IV-20** : projection stéréographique sur un plan horizontal de la course du soleil pour la ville de Tizi Ouzou (Source :Kesraoui, 2010)

### C<sub>2</sub>)La projection sur un plan vertical

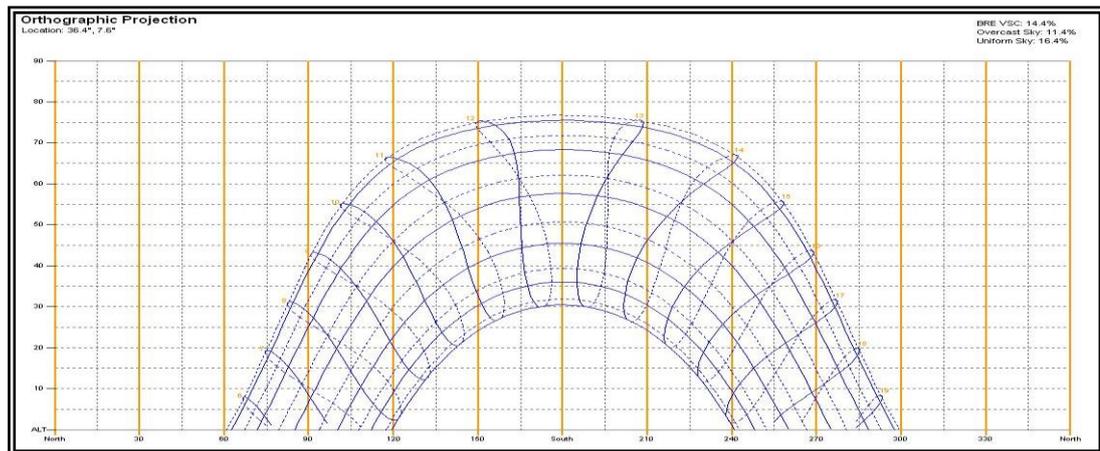
La voûte céleste est la partie visible du ciel dans toutes les directions au dessus de l'horizon.

Le diagramme en projection cylindrique permet de repérer le soleil par son azimut et sa hauteur angulaire, en joignant les différentes localisations du soleil à divers moments de la journée. On peut ainsi tracer la course du soleil pour n'importe quel jour de l'année, un réseau d'égale hauteur représente la trajectoire du soleil pour différentes journées de l'année. Il est limité par la courbe relative à la journée la plus longue (solstice d'été) et la journée la plus courte( solstice d'hiver).

L'intérêt d'un tel diagramme en énergétique solaire est de renseigner sur :

- La durée de l'enselement (en heures)
- La quantité d'énergie solaire incidente (en kWh/m<sup>2</sup>)

- L'ensoleillement des espaces urbains: périodes ombres/insolations
- La performance en protection solaire des masques architecturaux



**Figure IV-21:** Projection sur un plan vertical de la course du soleil pour la ville de Tizi Ouzou (Source : logiciel weather tool)

En résumé, le flux absorbé par la paroi se propage par conduction puis par convection avec l'air ambiant. Dans ce cas, l'inconfort est causé par la température radiante élevée, qui dépend essentiellement de sa couleur, de son orientation, ainsi des paramètres thermo physiques de l'enveloppe à savoir : la résistance thermique, la capacité calorifique et le coefficient radiatif et convectif de surface, ce qui va augmenter considérablement la température intérieure [Givoni, 1978].

#### IV-4-2-2-La température

Le rayonnement reçu par une surface et les échanges d'énergie avec l'air qui en résulte, entraîne un équilibre thermique au niveau de la surface qui correspond à une température presque toujours différente à celle de l'air. La température est un état instable dont la variation au voisinage de l'environnement humain dépend essentiellement de trois phénomènes à savoir. [Liebard et De Herde, 2005]:

- le rayonnement solaire.
- la vitesse du vent.
- l'altitude et la nature du sol.

La connaissance de cette donnée de base du climat, dans ses variations temporelles diurnes et saisonnières ainsi qu'en tout point de l'espace, est donc primordiale pour toute analyse climatique [Lavigne, Brejon et Fernandez, 1994].

##### IV-4-2-2-1-La température de l'air extérieure

Sous l'effet du rayonnement solaire, la couche d'air directement en contact avec le sol chaud est chauffée par conduction. Cette chaleur se transfère aux couches supérieures essentiellement par convection et par les turbulences de l'air. Les courants et les vents apportent

de grosses masses d'air au contact avec la surface terrestre. De ce fait, l'air est réchauffé. [Liebard et de Herde, 2005].

Les régimes annuels et diurnes de la température d'air dépendent aussi des variations de température de surface. La température varie également suivant la couverture nuageuse. Pour une journée claire, la température tend à s'élever parce que le rayonnement est important. A l'inverse, pendant la nuit la terre et donc l'atmosphère, se refroidira davantage par rayonnement infrarouge vers la voûte céleste [Lavigne et al , 1994].

Chaque jour, les stations météorologiques mesurent la température ambiante sous abri (ombre) et celle-ci est variable au cours de la journée. Cette évolution est variable d'un jour à l'autre et évidemment au cours de l'année. A partir de mesures sur une période de plusieurs années, on définit pour chaque mois [Lavigne et al, 1994]:

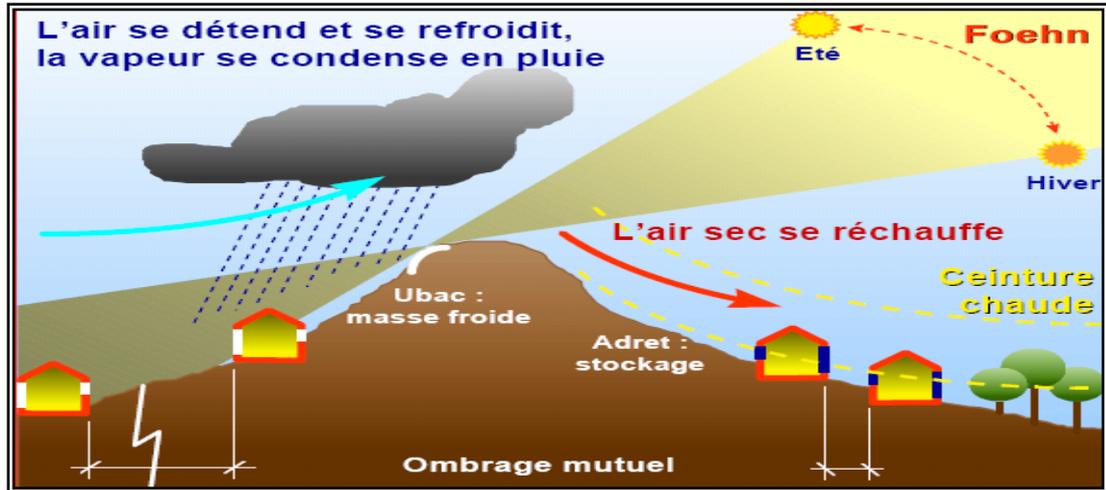
- **la température moyenne** : moyenne sur la période de mesure des moyennes de températures de chaque mois, celles-ci étant faites à partir des mesures de tous les jours du mois.
- **la température maximale moyenne** : moyenne sur la période de mesure des moyennes de températures maximales de tous les jours du mois.
- **la température minimale moyenne** : moyenne sur la période de mesure des moyennes de températures minimales de tous les jours du mois.

#### **IV-4-2-2-3-L'influence de l'environnement sur la température**

##### **a) Influence du relief**

Le relief influence la répartition des températures, les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et de régime des vents. Le relief joue sur les températures tant par les variations qu'il induit le jour grâce à l'irradiation des pentes (selon l'orientation et l'inclinaison) que par son influence sur le régime des vents. Les faces exposées aux vents sont plus froides que les faces masquées. [Liebard et De Herde, 2005].

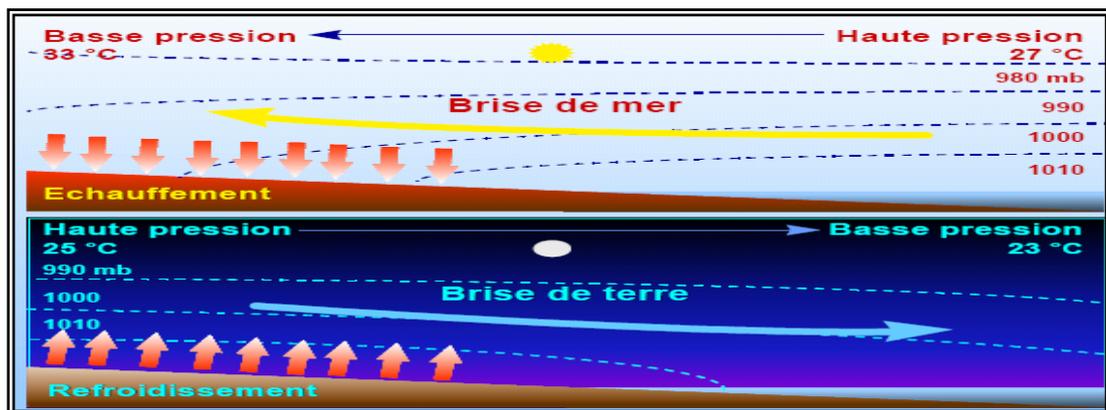
L'altitude influence aussi la température. La pression diminuant avec l'altitude, l'air se détend et se refroidit, cela est connu sous le nom de « refroidissement ou échauffement adiabatique ». Cette diminution de température est de l'ordre de  $1\text{C}^\circ$  par accroissement de 100m.



**Figure IV- 22:** Influence du relief sur la température  
(Source : Liebard et de Herde, 2005)

### b) L'influence de l'eau

Les étendues d'eau tempèrent les fluctuations de température. Elles jouent le rôle de tampon thermique. L'eau est caractérisée par une grande capacité thermique qui le rend sensible à la variation de température de l'atmosphère. La présence de l'eau provoque le rafraîchissement évaporatif, dont le changement de phase au cours du processus d'évaporation nécessite une quantité de chaleur importante qui est puisée dans l'air ambiant, ce qui a pour effet de diminuer la température de l'air tout en augmentant son humidité relative. L'efficacité du processus d'évaporation dépend des températures de l'air et de l'eau, de l'humidité de l'air, mais aussi de la circulation de l'air au niveau de la surface d'eau. [Liebard et De Herde, 2005].

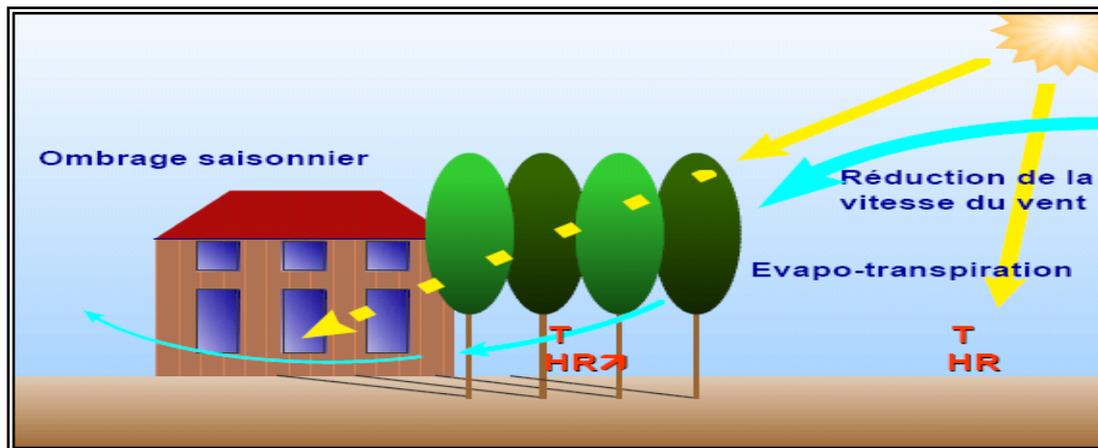


**Figure IV-23 :** Influence de l'eau sur la température  
(Source : Liebard et De Herde, 2005)

### c) L'influence de la végétation

Dans les régions fortement boisées, les arbres interceptent de 60 à 90% de la radiation solaire, empêchant l'augmentation de température du sol. Ainsi, l'air s'y échauffe dans une moindre mesure qu'ailleurs. Ce phénomène est permanent ou saisonnier suivant qu'il s'agisse d'arbres à feuillage permanent ou caduc. Par ailleurs, les arbres empêchent la radiation

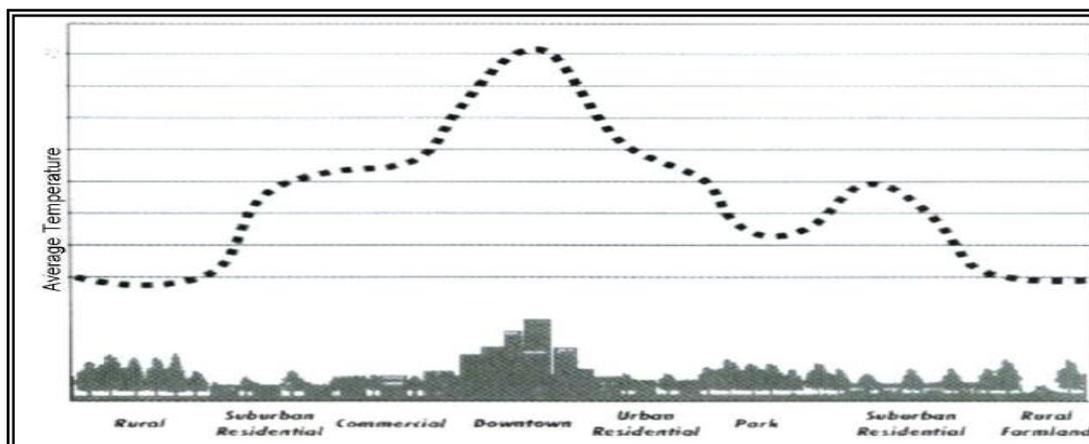
nocturne: la chute de température durant la nuit est donc limitée. On constate ainsi que les écarts de température sont moins importants dans les régions boisées. La végétation transpire de l'eau qui peut provoquer un effet de rafraîchissement passif par évaporation. Elle contribue à la réduction de température d'air de l'ordre de 2 à 3°C [Liebard et De Herde, 2005].



**Figure IV-24 :** Influence de la végétation sur la température  
(Source : Liebard et De Herde, 2005)

#### d) influence d'un site urbanisé

En ville, les apports gratuits provenant des véhicules, industries, chauffage, etc..., ainsi que la nature du sol et la quantité importante de matériaux à forte inertie réchauffent l'atmosphère. Le dôme de pollution recouvrant les villes limite également les radiations nocturnes, de telle sorte qu'en moyenne, la température en ville est de 3 à 5°C plus élevée qu'en site dégagé. La pollution ralentit le réchauffement matinal de l'air et la grande quantité de matériaux accumulateurs freine la chute de température en début de soirée. Les sites dégagés sont fortement balayés par les vents et largement ouverts vers la voûte céleste. Il y fait donc plus froid qu'ailleurs [Santamouris et al, 2001].



**Figure IV-25:** Influence du site urbain sur la température  
(Source : Ghiaus et al., 2000)

Les températures extérieures influent sur les températures intérieures par « l'effet de paroi chaude » [Châtelet et al, 1994].

#### **IV-4-2-3- Le vent**

Le vent est un déplacement d'air généré par les différences de pression entre des masses d'air : l'air s'écoule des zones de hautes pressions (anticyclone) vers les zones basses pression (dépression).

L'écoulement n'est pas rectiligne, à cause de la force de Coriolis. Mais il prend une forme S s'incurvant en divergeant de l'anticyclone et en convergeant vers la dépression. La divergence autour de l'anticyclone se fait dans le sens des aiguilles d'une montre, et la convergence autour de la dépression se fait en sens inverse (loi de Buys- Ballot) [Izard et Guyot, 1979].

Le vent est défini par trois paramètres [Lavigne et 1994]:

- sa vitesse moyenne, étant donné que près du sol l'écoulement est turbulent et que sa vitesse fluctue autour d'une moyenne ;
- sa direction et son sens ;
- la proportion de temps pendant laquelle il a lieu, soit sa fréquence.

Ces trois paramètres du vent mis en relation sur un même diagramme, nommé rose des vents.

#### **IV-4-2-3- 1- Les indicateurs du vent**

On peut distinguer deux classes [Lavigne et al, 1994] :

- **les indicateurs permanents** : il donne une image définitive d'un état engendré par le vent.
- l'élément végétal possède un pouvoir d'information des plus significatifs, car il s'agit d'un élément vivant qui subit les actions du vent. Cette classe d'indicateur permet de dégager les effets les plus contraignants sous un aspect fréquentiel. L'échelle de Beaufort en donne une bonne idée. [Lavigne et al, 1994].
- **les indicateurs instantanés** : il donne une image fugitive de l'impacte du vent sur l'environnement (ex : poussière, drapeau,...). [Lavigne et al, 1994].

#### **IV-4-2-3- 2- Les caractéristiques du vent**

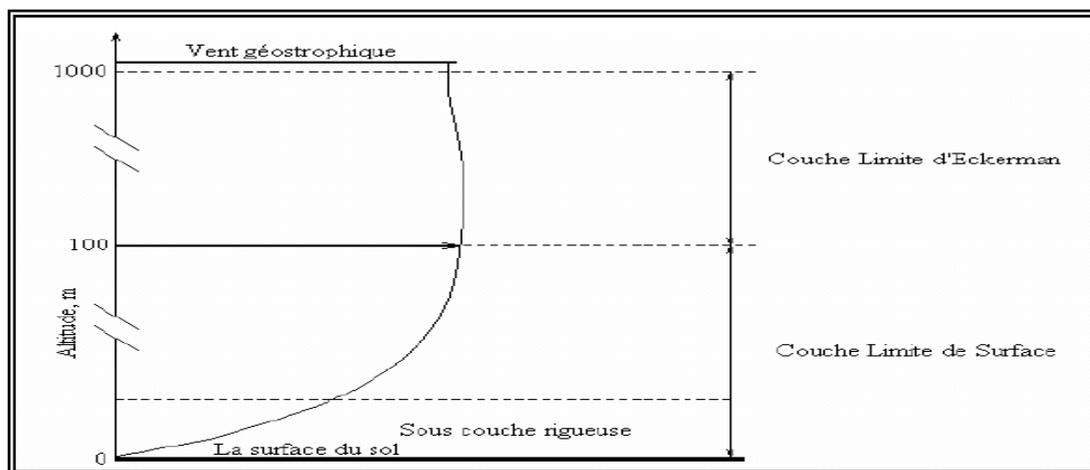
##### **a) La notion de la couche limite atmosphérique**

La couche limite atmosphérique, dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte

des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres [Bozonnet, 2005], tel que :

- la vitesse du vent ;
- la rugosité des sols ;
- l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée.

La couche limite atmosphérique (CLA), peut être divisée en deux sous couches, à savoir la couche limite de surface (CLS) et la couche limite d'Eckerman. [Bozonnet, 2005].



**Figure IV-26:** La couche limite atmosphérique  
(Source : Kasbadji , 2006)

Dans la CLA, le transport des différentes quantités que nous rencontrons (chaleur, polluants...) est principalement influencé horizontalement par le vent et verticalement par la turbulence. La structure de la CLA pour les zones plus hautes est variable selon l'heure de la journée. Le jour, elle se compose d'une couche de mélange (mixed layer) dominée par les phénomènes turbulents. Pendant la nuit, elle se compose d'une couche résiduelle moins turbulente de stratification neutre et d'une couche nocturne rendue stable par le contact d'un sol froid. Elle est peu turbulente. Les forces déterminant le vent dans cette zone sont les forces de pression, de frottement, de Coriolis et d'Archimède. [Bozonnet, 2005]

### **b) Les caractéristiques de la vitesse du vent**

Le vent caractéristique d'un site se définit par la combinaison de sa vitesse moyenne et de son intensité de turbulence. La vitesse moyenne du vent sur un site est liée à des phénomènes aérodynamiques et thermiques complexes. Au niveau des basses couches atmosphériques comprises entre 0 et 300m d'altitude [Liebard et De Herde, 2005], la vitesse moyenne du vent varie avec la topographie du site, la stratification thermique et la rugosité du sol. Les stratifications thermiques a une influence sur les écoulements d'air pour les vents de vitesse inférieure à 10m/s à une hauteur de 10m du sol [Liebard et De Herde, 2005]. Au delà de cette

vitesse, les effets thermiques deviennent négligeables. Les physiciens admettent alors que la stratification thermique est neutre localement. L'écoulement peut être décrit par les équations de conservation de la masse (ou équation de continuité), de conservation de la quantité de mouvement (Navier Stokes) et de conservation de l'énergie.

En terrain plat, l'influence de la hauteur et de la rugosité du terrain est exprimée par « la loi de puissance » :

$$U(z) = U_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)$$

$U(z)$  : vitesse moyenne du vent à une hauteur ( $z$ )

$U_{ref}$  : vitesse moyenne de référence donnée par les stations météorologiques

$z$  : hauteur sur laquelle on calcule la vitesse du vent

$z_{ref}$  : Hauteur de référence, à laquelle a été mesuré  $U_{ref}$  à la station météorologique

Une amélioration de cette formule revient à prendre en compte de ce paramètre, on introduit une constante de rugosité. Plus l'altitude est importante, moins la rugosité du sol influe sur la vitesse du vent.

Environnement du site	Classe de rugosité
Bord de mer totalement dégagé	I
Rase compagne	II
Zone rurale avec bâtiment ou arbre isolés	III
Zone urbanisée ou forestière	IV
Grande ville	V

**Tableau IV-01** : Classes et hauteur de rugosité  
(Source : Liebard et de Herde, 2005)

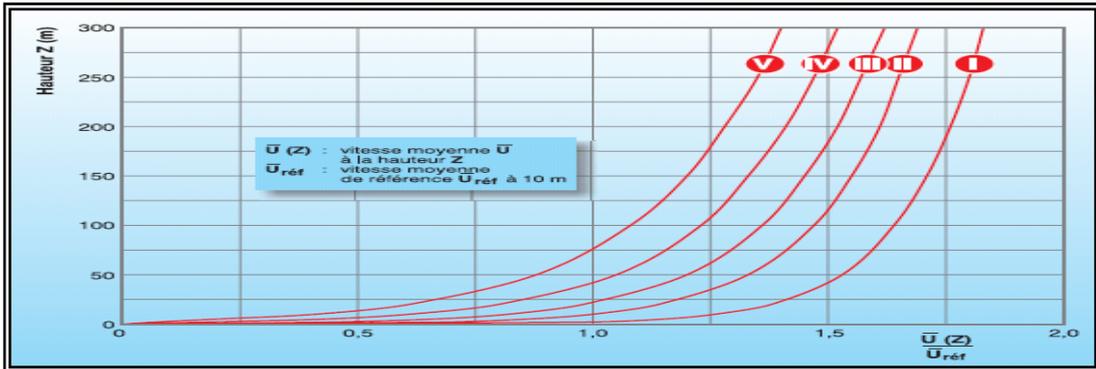
Un model logarithmique permet de décrire la croissance de la vitesse moyenne avec l'altitude

$$U(z) = K_0 \cdot U_{ref} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_{ref}}\right)$$

$K_0$  : Coefficient qui varie avec la rugosité (coefficient de Von Karman)

La turbulence dépend essentiellement de la nature du terrain. Elle se détermine selon une échelle spatio-temporelle par la dimension des bouffées et des rafales du vent. Cette dimension

dynamique du vent se traduit se traduit par une échelle de turbulence longitudinale suivant l'axe de vitesse du vent.



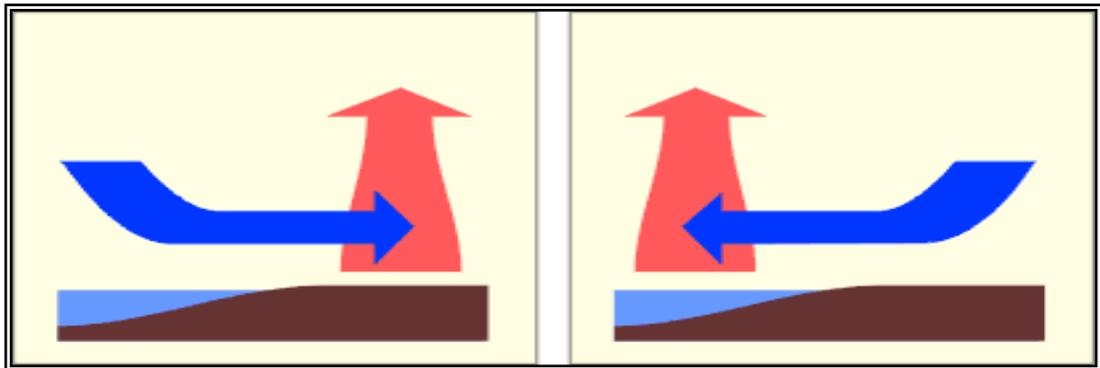
**Figure IV-27 : La vitesse du vent**  
(Source : Liebard et de Herde, 2005)

**b<sub>1</sub>) L'influence de l'environnement**

L'environnement a une grande influence sur la vitesse et la direction du vent, puisque celui-ci influence de façon importante le taux d'infiltration d'air du bâtiment et donc la détermination des besoins en énergie du bâtiment. Il est essentiel de connaître l'environnement dans lequel le bâtiment va être construit.

**- Les étendues d'eau**

Les masses d'eau étant plus chaudes que l'atmosphère en hiver et plus fraîche en été, les courants d'air créés par le gradient thermique s'inversent au cours de l'année. Lors des brusques variations de température (nuits fraîches par exemple) les courants d'air peuvent aussi s'inverser au cours d'une même journée.



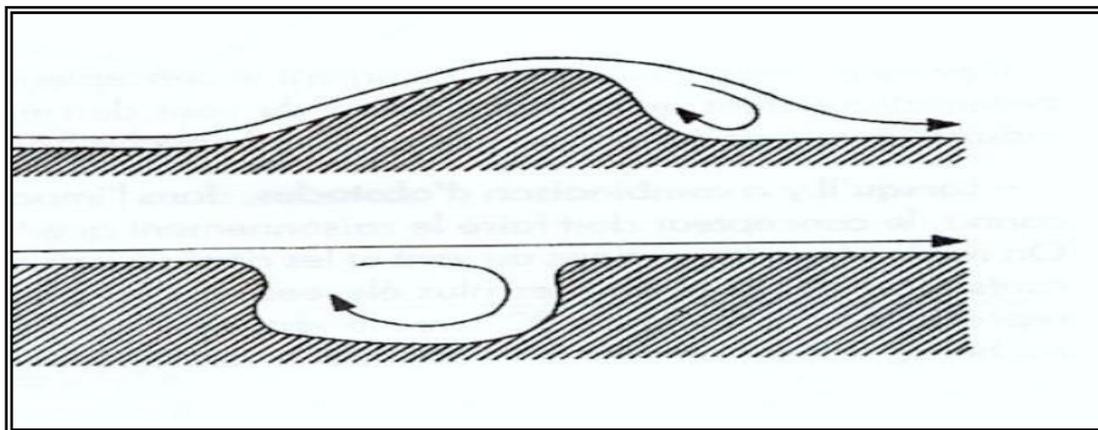
**Figure IV-28 : l'influence des étendues d'eau sur la vitesse du vent**

(Source : <http://www-climat.arch.ucl.ac.be>)

**-La topographie**

La topographie ne constitue pas un obstacle mais elle engendre éventuellement des modifications par rapport aux données générales relatives au vent.

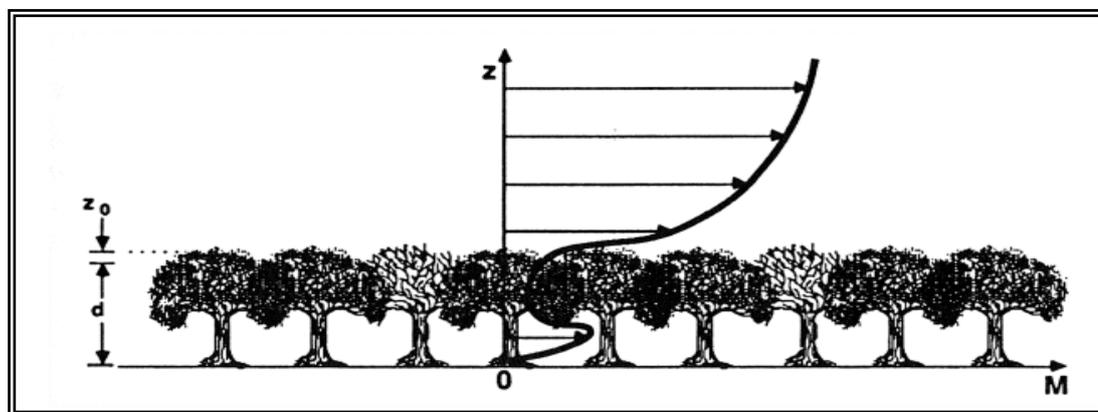
Ces changements s'effectuent à moyenne ou grande échelle. Le relief a pour effet de protéger certains sites mais aussi d'en surexposer d'autres. Par ailleurs, il peut modifier les vents dominants sur des grandes étendues.



**Figure IV-29:** l'influence u relief sur la vitesse du vent  
(Source : Izard et Guyot, 1979)

**- La végétation**

La végétation présente une rugosité par rapport à l'écoulement d'air. Une partie de flux incident pénètre à l'intérieur de feuillage et se trouve filtrée et amortie, diminuant en aval sensiblement les phénomènes tourbillonnaires. L'efficacité de l'effet du brise-vent dépend de la porosité effective de feuillage (rapport de surface des trous sur la face totale de la masse foliaire pondérée par un coefficient de perte de charge). Il est intéressant de noter que cette porosité peut être variable suivant la saison et les essences choisies. A cet effet, les plantations à feuilles caduques offrent une meilleure protection estivale qu'hivernale. Leur effet est négligeable durant l'hiver. [Izard et Guyot, 1979].



**Figure IV-30 :** l'influence de la végétation sur la vitesse du vent  
(Source Izard et Guyot, 1979)

**- L'effet du site urbanisé**

La couche limite urbaine (CLU) est un cas particulier de la couche limite atmosphérique. Ce qui la différencie nettement de la couche limite atmosphérique est l'existence au-dessus des villes d'un îlot de chaleur, caractérisé par des températures plus élevées qu'au-dessus de la

campagne environnante. Nous pouvons tous constater ce phénomène l'hiver en observant la quantité de givre sur les parts brise de voitures. Les véhicules sortant de l'agglomération en sont généralement dépourvus alors que ceux venant de la périphérie, moins denses en construction, sont couverts d'une pellicule blanche. Des écarts de température (fonction du vent et du nombre d'habitants) allant jusqu'à 12° [Oke, 1987] ont été relevés.

### c) Effet du vent sur la température intérieure du bâtiment

L'air possède une très faible capacité thermique et par conséquent lorsque le bâtiment n'est pas ventilé, la température de l'air intérieur atteint celle des surfaces intérieures environnantes et fluctue autour de la température de surface extérieure moyenne. Les relations entre les températures moyennes de l'air à l'extérieur et à l'intérieur dépendent pour une grande part à la couleur du mur externe, la température de la surface. La température étant d'autant plus élevée que la couleur du mur extérieur est plus sombre. L'amplitude de la fluctuation dépend du produit de la capacité calorifique de la structure par sa résistance thermique ainsi que l'écart moyen des températures des surfaces externes [Givoni, 1978].

Lorsque le bâtiment est ventilé, l'air pénètre dans l'espace intérieur est à la température extérieure d'origine, mais en traversant cet espace, il se mélange avec l'air intérieur et il échange de la chaleur avec les surfaces intérieures en fonction du gradient de température intérieur-extérieur [Givoni, 1978].

La quantité de chaleur enlevée ou ajoutée à l'espace intérieur ( $Q$  en  $W$ ) est le produit de taux de ventilation ( $V$  en  $m^3/h$ ) et de la capacité volumétrique calorifique de l'air ( $0.32Wh/°C$ ) et de l'écart entre la température moyenne extérieure et intérieure ( $t_i - t_e$ ) c'est-à-dire

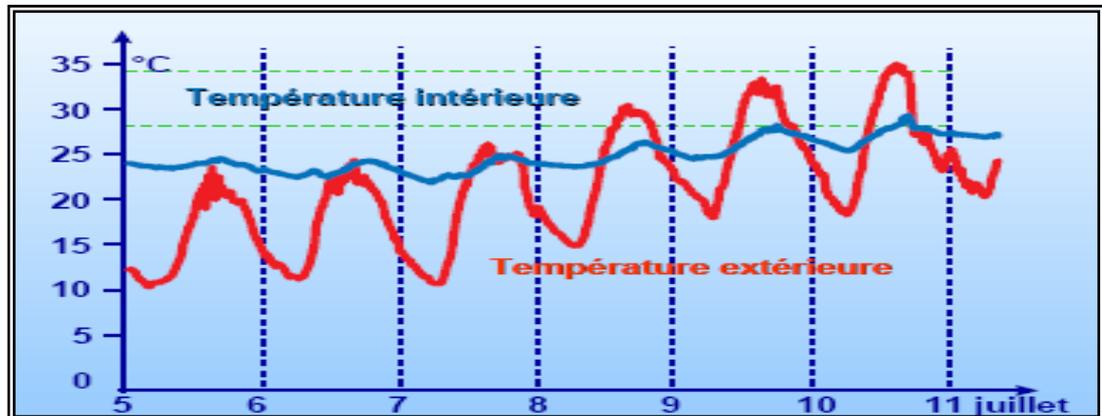
$$Q = 0.32 V (t_i - t_e)$$

La relation entre la température intérieure et extérieure pendant la journée dépend de la conception du bâtiment en particulier de la couleur externe des parois et de la grandeur et de la protection des fenêtres [Givoni, 1978].

Quand un bâtiment est ventilé, l'air intérieur se renouvelle rapidement et n'a pas le temps d'atteindre les températures des surfaces environnantes. En conséquence, les régimes de température de l'air interne et externe sont voisins et il y a de faibles variations entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ventilé [Givoni, 1978].

Dans les climats chauds, la ventilation peut apporter de la chaleur pendant un certain moment de la journée, lorsque l'air extérieur est plus chaud que celui que l'on respire à

l'intérieur, et si on le laisse entrer dans le local, non seulement l'effet direct recherché (un rafraîchissement) ne sera pas obtenu, mais on permettra à la masse thermique intérieure de se charger en calories qui réapparaîtront lorsque la température extérieure commencera à baisser, cet effet de stockage cumulant de l'un à l'autre, la température intérieure moyenne finit par atteindre des valeurs intolérables. De ce fait, il est souhaitable de réduire à un minimum la ventilation pour l'évacuation des odeurs générées dans le local et d'ouvrir les fenêtres pendant les heures où la température extérieure est plus fraîche. [Izard et Guyot, 1979].



**Figure IV-31** : l'influence de la ventilation nocturne sur la température intérieure  
(Source : Liebard et De Herde, 2005)

En résumé, le vent affecte la température intérieure par:

- l'augmentation du débit d'air (**Da**) qui contribue à diminuer la température ambiante lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure ;
- l'augmentation de la vitesse d'air (**Va**) qui permet de rentabiliser le bon fonctionnement de « l'appareil de climatisation des occupants » : la sudation.

Et ce par deux moteurs naturels de la ventilation qui sont l'effet du vent (ventilation traversant), ou le tirage thermique (stratification de l'air, effet de cheminée).

#### IV-4-2-4-L'humidité relative

L'air est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. L'humidité relative HR est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette même température. Elle dépend des précipitations, de la végétation et du type de sol, du régime des vents et d'ensoleillement, qui peuvent favoriser son assèchement. [Liebard et De Herde, 2005].

L'air est sec lorsque HR=0%, il est saturé pour HR=100%. Entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation du confort thermique, mais elle reste importante car, dans les conditions de température donnée, l'échange thermique, a lieu surtout par évaporation à la

surface de la peau. Aussi dans une ambiance saturée où il n'est plus possible de transpirer, le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort. [Liebard et De Herde, 2005].

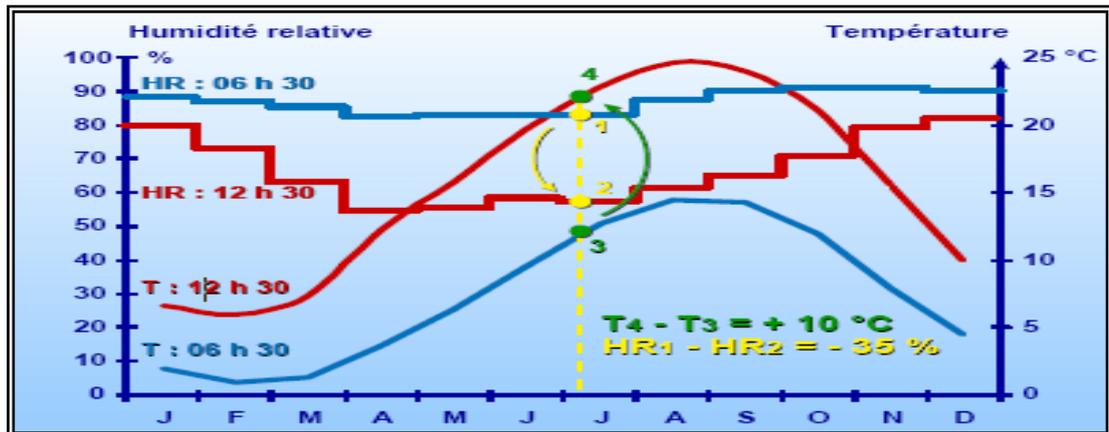


Figure IV-32: L'évolution de l'humidité relative en fonction de la température (Source :Liebard et de Herde, 2005)

Les stations de météorologie fournissent les valeurs de l'humidité relative moyenne et son évolution journalière. Elles fournissent de même les données pluviométriques moyennes annuelles et mensuelles.

Enfin, rappelons que les changements d'état de l'eau mettent en jeu d'importantes quantités d'énergie (enthalpie). C'est le cas pour l'évaporation, passage de l'état liquide à l'état gazeux, qui consomme cette énergie, et pour la condensation, passage de l'état gazeux à l'état liquide, qui restitue cette énergie.

Une bonne connaissance des caractéristiques de l'air humide : humidité relative, humidité absolue, la température humide, température sèche, point de rosée donnée par le diagramme psychrométrique (diagramme de l'air humide) est indispensable pour déterminer le pouvoir desséchant.

- **Humidité absolue W** : c'est le rapport de la masse de vapeur d'eau  $m$  à la masse d'air sec  $m_a$  présente dans un même volume : [kg eau / kg air sec]. Ce rapport est difficile à mesurer car il faut utiliser un système de dessiccation pour séparer l'air sec de la vapeur. En pratique, on ne mesure jamais l'humidité absolue directement. Les appareils de mesure donnent en général l'humidité relative ou le point de rosée [ADEM et CSTB, 2005].
- **Température de rosée** : La température de rosée, appelée aussi point de rosée, est la température qu'il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation et donc obtenir un début de condensation (d'où le nom de rosée). Lorsque cette température de rosée

Tr est atteinte, la pression partielle de la vapeur est égale à la pression de saturation ( $P_v = P_{vs}$ ), et on a un taux d'humidité relative de 100 % [ADEM et CSTB, 2005].

- **Température humide :** C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est humidifié. Pour calculer la température humide, on projette orthogonalement l'axe des températures sèches sur la courbe de saturation. La température humide se lit sur la courbe de saturation du diagramme et se déplace suivant une oblique. Elle est exprimée en °C. La température humide  $T_h$  représente la température humide d'un air pris à la température sèche  $T_1$  et à l'humidité spécifique  $w_1$ .
- **Température Sèche :** Température mesurée à l'aide d'un thermomètre traditionnel. C'est la température qui se lit en abscisse sur le diagramme psychrométrique.

#### IV-4-3-Les apports internes

Si les apports solaires constituent la principale source de chaleur dans le bâtiment, il convient également de prendre en compte les apports de chaleur directement produits par à l'intérieur des locaux. Ces apports sont produits par les occupants (métabolisme), l'éclairage et les appareils électriques,... on peut dire que ces apports sont inévitables dès lors que les locaux sont habités. [Izard. 1994].

On peut retenir pour l'ensemble des apports une valeur moyenne de 90 Wh par jour et par  $m^2$  de surface habitable. [Izard.1994].

Cette valeur correspond à une élévation de température d'ordre de 1°C si le bâtiment est peu ventilé, inférieur à 0.5°C si le bâtiment est bien ventilé. Il faut noter cependant que ces valeurs sont variables selon le comportement des occupants. [Izard.1994].

Ces apports constituent donc un facteur d'aggravation de l'inconfort chaud, sur lequel les moyens d'action architecturaux sont limités. Seules, une bonne ventilation et un comportement adéquat de l'occupant peuvent réduire ces apports ou leur influence sur la température intérieure. [Izard.1994].

#### IV-4-4-Les effets thermiques de l'enveloppe sur la température d'une ambiance intérieure

En été, dans les régions chaudes, les flux thermiques sont essentiellement variables, et leur évolution dans le temps peut être considérée comme une sinusoïde. Deux types de flux peuvent être distingués [Izard.1994] :

- les flux externes, dus à l'amplitude de la température extérieure et à l'absorption des flux solaires par les parois extérieures opaques.
- Les flux internes dus à la pénétration solaire par les ouvertures et aux fluctuations du régime des apports internes.

L'augmentation de la température de l'air extérieure provoque un flux de chaleur sur les surfaces externes de l'enveloppe du bâtiment et élève leur température. Cet effet est à peu près identique pour toutes les surfaces, en regard de leur position au même temps, le rayonnement solaire, qu'il soit direct ou diffusé par le ciel ou réfléchi par les surfaces environnantes arrive sur le bâtiment. Une partie de ce rayonnement est réfléchi, mais le reste est absorbé par la surface élevant sa température jusqu'à un niveau supérieur de la température ambiante.

Le bilan des échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments qui conditionnent ainsi l'ambiance thermique intérieure et le confort des occupants dépend des caractéristiques thermo physiques de l'enveloppe qui sont:

- la conductivité thermique  $\lambda$ , résistance R et conductance (K) ;
- les caractéristiques de surface vis-à-vis le rayonnement solaire : l'absorption, la réflexion et l'émission ;
- la diffusivité thermique (a), ( $m^2/h$  ou s) ;
- l'effusivité thermique (b), (capacité d'absorption  $W/^\circ C m^2$ ) ;
- le coefficient radiatif et convectif de surface ;
- la capacité calorifique.

D'après cette analyse on peut résumer qu'en été, ou en climat chaud, la température intérieure d'un bâtiment non climatisé évolue d'une manière tout à fait spontanée. Cette température dépend d'un certain nombre de facteurs liés soit à l'architecture elle-même, soit aux conditions d'occupation du bâtiment. [Izard.1994].

La température intérieure d'un local non climatisé est égale à la somme des trois paramètres :

$$T_i = T_{e\text{ moy}} + S T_{si} + VT_i$$

$T_{e\text{ moy}}$  : est la température moyenne extérieure

$ST_{si}$  est le supplément moyen de température intérieure du aux apports solaires et internes

$VT_i$  est la variation diurne de température autour de la moyenne intérieure qu se fait entre +  $A_i$  et  $-A_i$ ,  $A_i$  étant l'amplitude de température intérieure.

- $T_{e\text{ moy}}$ , **température moyenne extérieure**

Cette grandeur est une caractéristique du site de construction, cette donnée est fournie par les stations météorologiques.

**-  $ST_{si}$  , supplément de température intérieure moyenne :**

Cette notion est capitale pour comprendre comment fonctionne thermiquement un bâtiment en période estivale.

Les sources de chaleur internes du bâtiment provoquent un échauffement moyen de celui-ci, que l'on peut quantifier en valeur moyenne sur une journée (régime permanent). La grandeur de cet échauffement dépend de la puissance des sources de chaleur et des déperditions voulues ou non voulues dont le bâtiment est le siège. Ce supplément se décompose en  $ST_s$  pour les apports solaires et  $ST_i$  pour les apports internes. On peut donc formuler de la manière suivante

$$ST_{si} = ST_s + ST_i$$

Le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur de l'espace habité constitue une source de chaleur.

On peut dire que le supplément de température intérieure solaire,  $ST_s$  est égal à l'apport de l'énergie solaire entrante dans le local et des déperditions totales par degré d'écart du local :

$$ST_s = \text{puissance solaire entrante} / (G1V + 0.35q)$$

Où :

La puissance solaire entrante correspond à l'énergie transmise aux locaux par les baies et par les parois opaques exposées au rayonnement solaire global (W).

$G1 \cdot v$  est le total des déperditions par degré d'écart à travers les parois de l'enveloppe (produit de coefficient  $G1$  par le volume).

- 0.35 est la chaleur volumique de l'air ( $Wh/^\circ C m^3$ )

-  $Q$  est le débit de ventilation que l'on suppose permanent ( $m^3/h$ )

$C$ 'est la même chose pour les apports internes

-  $v \cdot Ti$ , variation diurne de la température intérieure

Cette variation dépend de quatre facteurs

- L'amplitude de température extérieure différence ( $T_{max} - T_{min}$ ), donnée climatique ;
- L'inertie thermique utile du local : plus cette inertie est forte, plus l'amortissement de l'amplitude extérieure est grand, et donc l'amplitude intérieure est faible ;
- Les apports solaires : ces apports étant diurnes, ils contribuent à relever sélectivement les températures diurnes, c'est-à-dire augmenter  $Ai$ . Cette augmentation de  $Ai$  sera d'autant plus marquée que l'inertie thermique sera faible ;

- La ventilation du local qui peut soit restituer l'amplitude extérieure ( si la ventilation est forte et permanente) , soit laisser agir l'amortissement (ventilation nulle), soit conduire à une situation intermédiaire (ventilation diurne ou nocturne).

On peut donc dire à priori, pour une amplitude extérieure donnée et une ventilation faible que :

- sans apports solaires et avec une forte inertie thermique,  $A_i$  et  $v.T_i$  seront faibles.
- avec les apports solaires et une faible inertie thermique,  $A_i$  et  $v.T_i$  seront importants.

En définitive, la température intérieure évolue entre deux valeurs,  $T_{i_{max}}$  et  $T_{i_{min}}$

Les objectifs à poursuivre pour maintenir la température moyenne intérieure à une valeur proche de celle de la température extérieure en période chaude peuvent donc se résumer de la manière suivante :

- Contrôler les apports solaires ;
- Diminuer les apports internes ;
- Augmenter le coefficient G1 (en tout cas, ne pas chercher à le réduire) ;
- Augmenter le débit de ventilation (ce qui n'est utile que quand la température extérieure est plus fraîche que la température intérieure).

Enfin, pour maintenir l'amplitude de température intérieure entre certaines limites, il sera nécessaire de s'intéresser au système constructif et aux matériaux utilisés, qui détermine l'inertie du bâtiment et pour descendre en dessous de ce seuil, il faut faire appel à des procédés de refroidissement passif.

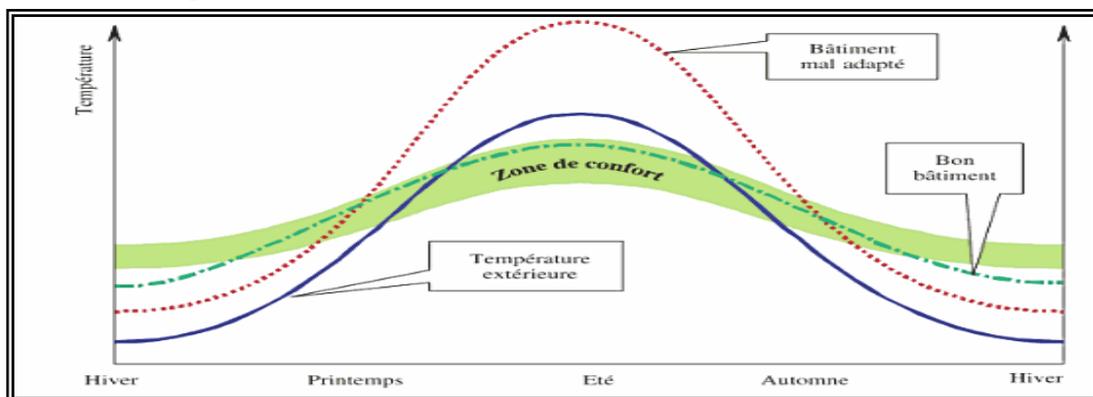


Figure IV-33 : évolution de température dans un bâtiment  
(Source : Roulet, 2004)

#### IV-5-Le puits canadien ou provençal et son intégration dans le bâtiment pour répondre aux besoins de rafraîchissement dans le bâtiment

Les recherches sur les systèmes de refroidissement couplés au sol, qui sont énergétiquement efficaces que les systèmes conventionnels de refroidissement, ont été réalisés

pendant plusieurs années. Deux manières ont été élaborées pour l'usage du sol comme source de fraîcheur : contact direct et contact indirect [Mihalakakou et al, 1992]. Dans un premier temps, l'intérêt était d'assurer un contact direct du bâtiment avec le sol, afin d'y tirer profit, du fait que la température du sol est plus basse que celle de l'air ambiant [Labs, 1989 ; Dahlem, 2000]. Le contact direct avec le sol permet la dissipation des pertes de chaleur du bâtiment au sol pour maintenir la température intérieure du bâtiment proche à la température du sol adjacent (augmenter les échanges par conduction) [Santamouris et al, 1996]. Le refroidissement Direct du bâtiment est seulement possible si la température du sol est inférieure à la température désirée d'air à l'intérieur des bâtiments [Eicker, 2009]. Afin d'être efficace, la majeure partie de l'enveloppe du bâtiment doit être en contact avec le sol à une profondeur suffisante pour éliminer l'effet de variation de la température de surface. L'inconvénient principal du raccordement direct est que l'effet de déphasage thermique mène à une demande additionnelle de chauffage en hiver [Eicker, 2009]. Cette restriction ne peut pas être rencontrée dans la pratique dans beaucoup d'endroits, rencontrée particulièrement dans les régions plus chaudes, tel que l'Afrique du Nord (Matmata- Tunisie ) [Gallo et al, 1998], le Moyen-Orient, parties de la Chine (fleuve jaune ), l'Inde et la plupart des pays tropicaux (Venezuela) [Atif, 1987].

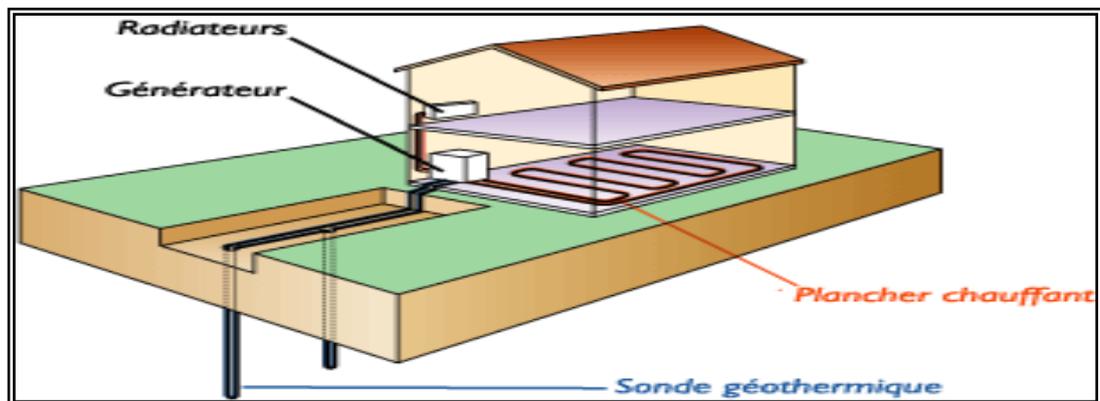
Là où le contact direct avec le sol n'est pas possible, le sol peut encore être employé comme un radiateur pour rafraîchir l'air extérieur par le moyen d'un échangeur de chaleur (géo-cooling). Si l'air est employé comme fluide de refroidissement, l'échangeur de chaleur est typiquement des tubes enterrés sous la surface, par lesquelles l'air est véhiculé dans le bâtiment par des ventilateurs électriques. De ce fait, l'énergie est transférée au sol adjacent par convection et conduction. Puisque l'air a une capacité de chaleur beaucoup plus petite que tout type de sol (par plusieurs ordres de grandeur) sa température deviendra égale à celle du sol après une certaine distance avec seulement de petite perturbation de régime de température du sol. [Eicker, 2009].

Le refroidissement par le moyen d'échangeur de chaleur (geo-cooling) comprend deux types de systèmes principaux. Le premier est basé sur les sondes géothermiques verticales ou les géo structures énergétiques et le deuxième sur les puits canadiens ou puits provençaux (systèmes horizontaux) qui fera l'objet de notre étude [suisse énergie, 2005].

Dans le cas de sondes géothermiques verticales, la source de fraîcheur se situe bien en dessous de la zone subissant les variations saisonnières de température, qui correspond environ aux 15 premiers mètres de profondeur [Hyde, 2008]. On dispose ainsi d'un stock de grandes

capacités thermiques dont la température initiale se situe aux alentours de 17° C, pour le cas de l'Algérie [Kaced et Nebbali, 2010]. Les propriétés géologiques et hydrogéologiques du lieu sont déterminantes sur les performances thermiques du système et donc sur son dimensionnement. De même, la prestation hivernale (chauffage) est le plus souvent nécessaire pour effectuer une recharge thermique saisonnière du stockage et garantir ainsi le fonctionnement du système geocooling (et vice versa). Le fluide caloporteur est généralement un mélange d'eau et d'antigel qui circule en circuit fermé entre les tubes en double U des sondes et le système de chauffage / rafraîchissement du bâtiment [suisse énergie, 2005]. Les caractéristiques de ce système sont donc [Lachal, 2008] :

- Relative symétrie pour le potentiel d'utilisation hivernale (chauffage) et estivale (rafraîchissement), avec un écart entre température extérieure et stock de 10 K environ,
- Insensibilité vis-à-vis de la face supérieure,
- Forte interaction avec les propriétés géologiques et hydrogéologiques du lieu,
- Risque d'épuisement ou de saturation du stockage à long terme,
- Fort lien avec la prestation hivernale.

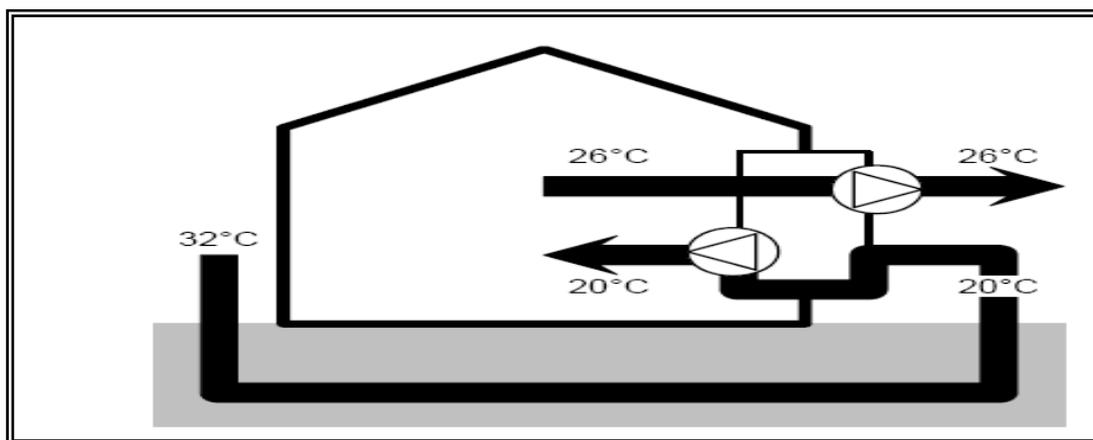


**Figure IV-34** : Sonde géothermique verticale  
(Source : Lachal, 2008)

Dans le cas de puits canadiens, il s'agit de rafraîchir l'air du système de ventilation avant qu'il ne pénètre dans le bâtiment, en le faisant passer par des tubes enterrés horizontalement, sous le bâtiment ou à l'extérieur de celui-ci [suisse énergie, 2005]. Ce qui nous amène à distinguer les caractéristiques suivantes [Lachal, 2008] :

- faible écart de température moyenne journalière entre extérieur et sous-sol,
- importance de la surface supérieure,
- relative indépendance vis à vis des propriétés géologiques du lieu,
- indépendance de l'utilisation hivernale (si le système est basé sur l'amortissement journalier),

- pérennité thermique assurée par le rythme saisonnier du climat extérieur (ou du bâtiment qui se trouve en dessus du système).



**Figure IV-35 : Puits canadien : capteur horizontal**  
(Source : Trombe, 2004)

Dans les deux cas, on utilise l'inertie thermique du terrain pour amortir les variations journalières de température de l'air et avoir une température de ventilation qui reste stable au cours de la journée.

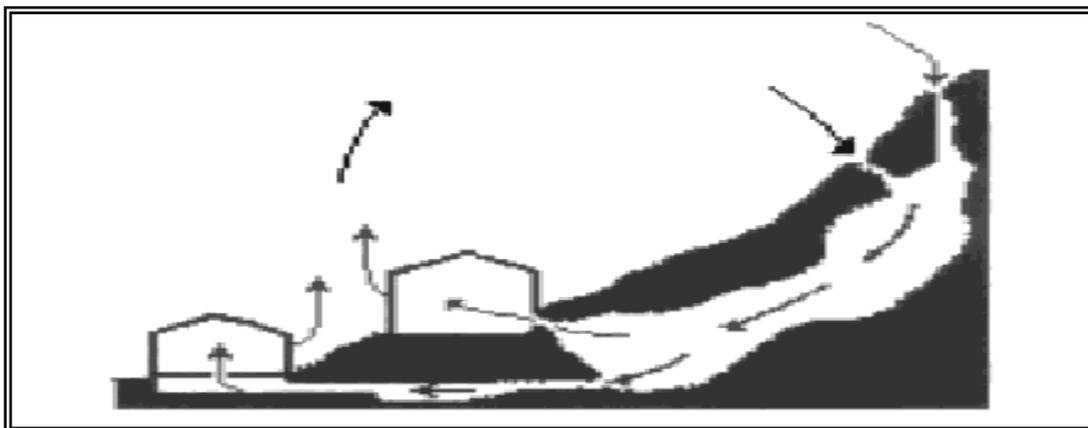
#### IV-5-1- Les origines de la technique

Le puits provençal cache bien son jeu : ce n'est pas vraiment un " puits ", et il n'est pas uniquement originaire de Provence, il est réversible, très répandu en Amérique du Nord peut être utilisé en Hiver pour préchauffer l'air qui pénètre dans la maison [Powell, 2005].

L'utilisation de cette technique pour le préchauffage et le rafraîchissement des bâtiments remonte fort loin dans le temps, des civilisations anciennes utilisant déjà des hypocaustes (ancienne civilisation Américaine), ancien système de chauffage et de conditionnement de l'air par le sol, radiant par panneau, s'emb le être en Grèce (2500 av J.C) puis apparus au Moyen Orient (Palais de Beycesutan en Turquie, environ 1300 av JC) et fut découvert par la suite au Tibet, au Nord de la Chine (installé pour le chauffage des bains, sous les lits et pour les bâtiments entiers). Au 1<sup>er</sup> siècle ap J.C, on peut noter la présence de deux systèmes : hypocauste des Romains et Ondol en Corée. Il s'agit de faire circuler l'air chaud dans un soubassement, puis fut abandonnée après la chute de l'Empire Romain [Raoul, 2007].

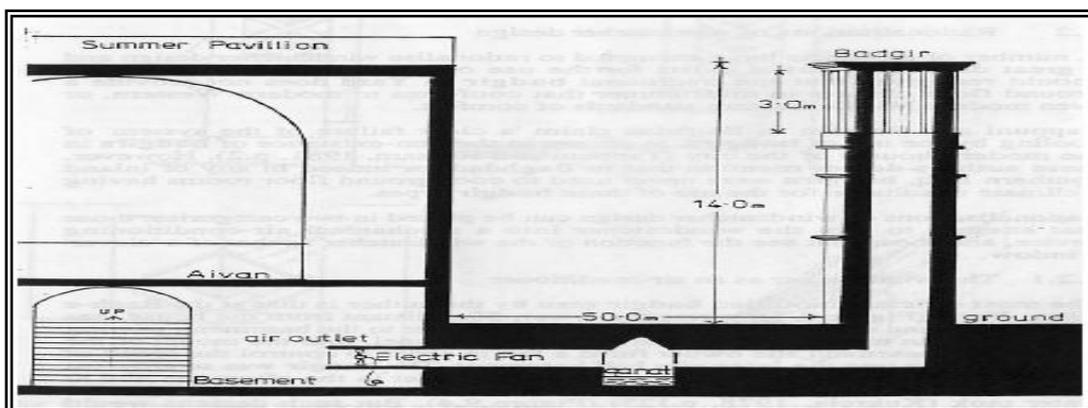
En fait, une technique semblable était déjà employée avant notre ère. Dès le XVI<sup>e</sup> siècle, des cavités naturelles (les Covolis) ont été utilisées pour rafraîchir un groupe de villas dans le Costozza, près de Longare, au pied des collines de Berici (Italie), appelée le Covoli [Salomon et Aubert, 2004]. Ce système ingénieux de refroidissement par le sol est relié à elles au moyen de galeries souterraines, pour se servir de l'air refroidi pendant l'été. L'air frais est entraîné du

covoli, ou des galeries, à un sous-sol, et distribué avec l'effet cheminé aux salles supérieures par des passages et des ouvertures [Allard et Santamouris,1998].



**Figure IV-36:** Ground cooling ventilation in Covoli villas  
(Source: Allard et Santamouris,1998)

Cette technique est très proche de celle de capteur à vent ou Malqaf (Wind catcher) , modèle très répandu dans les climats chaud et aride, notamment le Moyen Orient (Pakistan, Iran, Yémen,...). En citant l'exemple de la ville de Bam, une tour à vent est utilisée différemment elle se trouve à environ 50 mètres du bâtiment qu'elle dessert et un tunnel souterrain relie son extrémité inférieure au sous-sol du bâtiment, planté d'arbres, d'arbustes et du gazon sur le sol qui recouvre le tunnel. Quand on arrose le sol, l'eau s'infiltré dans la terre et humidifie les murs du tunnel, de sorte que l'air descend de la tour et qui passe dans le tunnel est refroidi par ventilation et par évaporation, un bassin et une fontaine, placés à l'endroit où l'air refroidi entre dans le bâtiment, apporte un refroidissement supplémentaire [Bahadori, 1978].



**Figure IV-37:** tour à vent avec souterrain pour un refroidissement Evaporatif (Source : Ghaemmaghami et Mahmoudi, 2005 )

Récemment, un regain d'intérêt pour cette technique s'observe dans le milieu de la construction et de l'énergétique, souvent accompagné aux échangeurs air/ sol. La recherche sur les échangeurs air-sol semble avoir démarré après le choc pétrolier de 1979 et s'être arrêtée temporairement après le contre-choc de 1985 [Tzaferis et al. 1992]. Ce n'est que depuis 1995

que quelques chercheurs ont repris des études sur les questions des performances des échangeurs air-sol, de leur comportement thermique et de leur intégration au bâtiment comme système de pré-conditionnement de l'air [Thiers, 2008].

#### **IV-5-2- Le principe de fonctionnement**

Avant de définir le principe de fonctionnement du puits provençal, il est important de souligner que la maîtrise de la demande énergétique d'un bâtiment passe avant tout par un travail soigné de l'enveloppe qui combine isolation, protection solaire et utilisation de la masse thermique. C'est en général une fois ces mesures de bases sont prises et la gestion des apports internes optimisée que l'appel à des techniques passives de pré conditionnement de l'air prend tout son intérêt.

En fonction des conditions atmosphériques, de l'heure, du jour et de la saison, l'air extérieur subit de fortes variations de température et d'hygrométrie. À l'opposé, le sol, à quelques mètres sous sa surface, présente une température peu variable en raison de sa grande inertie thermique [Hollmuller et al, 2005].

Le puits provençal, système géothermique dit de surface, tire partie de cette grande inertie en mettant en contact thermique l'air extérieur avec le sol. Sa finalité première est le pré conditionnement thermique et hygrométrique de l'air de ventilation des bâtiments [Powell, 2005].

Concrètement, le puits provençal (échangeur air/sol) est constitué de tubes enterrés à quelques mètres de profondeur sous le sol, à proximité ou directement sous le bâtiment à ventiler. L'air provenant de l'extérieur, mu par un ventilateur, parcourt les tubes avant d'être insufflé dans le bâtiment. Durant son séjour dans les tubes, l'air échange ses calories avec le sol et peut aussi déposer une partie de l'eau dont il était chargé dans les tubes. L'échangeur air-sol atténue donc les variations thermiques et hygrométriques de l'air extérieur, ce qui correspond à un pré-conditionnement de l'air. Ce système consomme très peu d'électricité, il est donc quasiment passif. [Roulet, 2004].

Ainsi, ce type d'équipement n'est pas adapté à tous les bâtiments. En effet, sa construction nécessite la réalisation de tranchées relativement profondes (de un à plusieurs mètres) et un espace au sol relativement important est requis. Il semble donc plus adapté aux bâtiments construits en zone ouverte (quartier pavillonnaire, zone d'activité) qu'à ceux situés en zone urbaine dense. Des bâtiments de toute taille peuvent en être équipés, depuis les maisons individuelles jusqu'aux logements collectifs et aux bâtiments de bureaux. De point de vue

technique et économique, il est préférable d'implanter l'échangeur au moment de la réalisation du gros œuvre, plutôt qu'après la mise en service du bâtiment [Powell, 2005].

### **IV-5-3-Analyse et état de l'art**

Dans ce paragraphe nous nous intéressons aux différents travaux de recherche sur les puits canadiens ou provençaux ainsi que le développement des paramètres qui interviennent dans la modalisation de ces derniers, interprétés par outils de simulation résumés dans ressources bibliographiques citées ci après.

#### **IV-5-3-1-Expérimentation de l'INSA de Toulouse**

Le document de [Trombe et Bourret, 1993] propose une modélisation d'un puits canadien suivie de sa validation expérimentale. Le modèle est construit grâce au principe de superposition permettant de chercher des solutions séparées pour les différentes sollicitations thermiques subies par la terre, la solution étant la somme des solutions séparées. Dans notre cas la terre est soumise à un échange thermique au niveau de la surface et à la charge imposée par le puits canadien.

Le modèle prend en compte tous les phénomènes de transfert de chaleur à l'exception des échanges radiatifs et latents au niveau de la surface et des échanges latents dans le puits. Les échanges radiatifs sont principalement l'ensoleillement reçu par le sol et dans une moindre mesure les radiations émises par le sol vers le ciel la nuit. Les échanges latents sont relatifs à l'évaporation de l'eau. Les échanges latents dans les puits, en l'absence d'infiltrations sont négligés.

L'avantage de ce modèle est d'être analytique. Il évite ainsi un maillage de la terre qui est délicat étant donné la géométrie du problème. Cependant, la présence de fonctions mathématiques dans les formules est susceptible d'augmenter nécessairement le temps de calcul. En outre, le principe de superposition peut être extrapolé à plusieurs puits facilement alors que c'est très délicat dans le cas des modélisations numériques par maille. Les deuxième et troisième parties constituent la validation expérimentale.

La deuxième partie est consacrée uniquement à l'expérimentation. Elle présente trois expériences distinctes. La première est consacrée à l'étude d'un puits canadien classique et évalue son incidence sur la thermique d'un petit bâtiment. La seconde compare trois puits canadiens ne se différenciant que par le matériau le constituant. Enfin la troisième étudie l'évolution de la température du sol en l'absence de puits canadiens.

La première expérience étudiée à la fois l'été et l'hiver. Elle permet plusieurs constats. Les puits canadiens amortissent très bien l'oscillation jour-nuit qui passe d'une amplitude de 10°C pour l'air extérieur à 1°C pour la température de sortie des puits. En été, la température de sortie passe de 20 à 23°C entre début juillet et début Août. Ce qui montre l'incidence de l'utilisation des puits et donc la nécessité de modéliser les puits canadiens de manière dynamique.

La seconde montre d'autres approches possibles à travers l'analyse d'autres ressources. La capacité de rafraîchissement du système puisque l'air entre dans la pièce avec une température environ 5°C inférieure à celle de l'air extérieur. Pour l'hiver : Au mois de novembre et décembre la température de sortie vaut 14°C environ ce qui permet un préchauffage efficace de l'air de ventilation, environ 55% des besoins relatifs au renouvellement d'air sont assurés. Pendant la période allant de janvier à mars, ce chiffre n'est plus que de 25% à cause de la baisse de température de sortie du puits due à la fois à la baisse naturelle de température de la terre et aux prélèvements effectués pendant la période précédente. Au bilan, la couverture énergétique des puits canadiens pour le renouvellement d'air est d'environ 40%.

La seconde expérience compare les températures en sortie de 3 puits de 10 mètres de long de ne se différenciant que par le matériau les constituant. Les écarts ne dépassent pas 2°C. Dans le cas d'un puits canadien réel, c'est à dire d'une longueur d'environ 30 mètres, ils seront encore bien plus faibles (de l'ordre de 0,5°C). Le choix du matériau constitutif du puits n'influe donc pas de manière significative sur son efficacité.

La troisième expérience permet de vérifier la bonne concordance entre les valeurs expérimentales et théoriques de la température du sol en l'absence de puits canadien. La température expérimentale est supérieure de 1 °C au maximum à 2,5 mètres de profondeur. La troisième partie compare les mesures expérimentales avec les résultats donnés par le modèle. La température de sortie théorique est plus faible d'environ 0,5°C en moyenne par rapport à la température expérimentale été comme hiver. Les températures le long du canal sont suivies par pas de 3 mètres. Les profils de température concordent très bien confirmant ainsi la pertinence de la modélisation de l'échange thermique air-sol.

En conclusion de cette étude.

- Les performances des puits canadiens peuvent être évaluées grâce au modèle présenté avec une bonne précision à condition de bien connaître les caractéristiques thermiques du sol.

- En hiver les puits canadiens permettent de réaliser des économies de chauffage de l'ordre de 40% sur le poste de renouvellement d'air.
- En été, la puissance de froid lors des périodes les plus chaudes vaut 800 W par puits et elle pourrait être augmentée grâce à une augmentation de débit.

#### - Etude paramétrique

En partant du modèle ainsi construit et validé, la dernière partie de l'étude évalue l'influence des différents paramètres sur les performances du puits. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- Longueur du puits ;
- Diamètre de la conduite ;
- Débit d'air ;
- Profondeur du puits ;
- Type de sol ;
- Température du bâtiment.

#### - Scénario de fonctionnement

- La **longueur du puits** doit être comprise entre 25 et 40 mètres. En dessous de 25 mètres, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au delà de 40 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative.
- Le **diamètre de la conduite et le débit d'air** sont liés par la vitesse de l'air parcourant le puits. Celle-ci ne doit pas dépasser les 3 mètres par seconde afin de ne pas induire des pertes de charges trop importantes dans le puits. La qualité de l'échange varie peu en fonction du diamètre. Afin d'obtenir un débit significatif, ce dernier doit être compris entre 15 et 25 centimètres. Plus le débit est important, plus la longueur du puits devra être importante.
- La **température de sortie** est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. A l'INSA de Toulouse par exemple, elle vaut environ 9°C à 2 mètres alors qu'elle descend à 1,5°C à 7 mètres. Le puits doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol.
- Le **type de sol** n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un puits unique à condition que le débit ne soit pas trop élevé. Si par contre plusieurs puits sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer. Ce document n'étudie pas cette problématique.

La régulation consiste ici à couper le puits pendant la nuit en été. Elle n'a pas d'incidence importante quant à l'énergie récupérée. D'autres modes de régulation sont envisageables. On peut par exemple faire varier le débit en fonction des besoins. Ce mode plus difficile à implémenter n'a pas été testé.

#### **- Conclusion**

Cette étude est riche d'enseignements. Les principaux points à retenir sont les suivants :

- Les puits canadiens permettent l'économie d'environ 40% du poste de renouvellement d'air en hiver. Ils sont très intéressants dans les maisons à basse consommation énergétique où ce poste représente de 40 à 60% de l'énergie nécessaire au chauffage.
- En été, la puissance de froid fourni par les puits est considérable. Ils peuvent donc être employés pour le rafraîchissement également.
- Le modèle est valide, ce qui montre que la physique mise en jeu par le procédé est bien connue. Les puits canadiens peuvent donc être intégrés comme un système à part entière dans la thermique des bâtiments.
- L'étude paramétrique donne une plage de définition des puits canadiens. Ces derniers sont des tuyaux de 25 à 40 mètres de long, avec un diamètre de 15 à 25 centimètres enterré à une profondeur minimale de 1,5 mètres mais de préférence plus profondément.
- Enfin, le modèle construit est remarquable car il peut être généralisé à l'étude d'un réseau de puits canadiens et il ne nécessite pas d'effectuer un maillage sur la terre.

#### **IV-5-3-2-Expérimentation de l'Ariège**

Cette étude évalue le potentiel des puits canadiens sur une année entière en comparant deux maisons identiques ; la première est ventilée grâce à un puits canadien et la seconde par l'extérieur. [Trombe, 1993].

La maison et le puits canadien sont modélisés indépendamment et couplés sous TRNSYS. Après avoir validé la modélisation expérimentalement, des simulations dynamiques sont effectuées dans le but de tester l'efficacité des puits canadiens pour trois applications : le rafraîchissement en été, le préchauffage de l'air en hiver et la mise hors gel du bâtiment. Elles utilisent les bases météo de Toulouse. Un taux de renouvellement d'air de 0,7 volume/heure est suffisant pour abaisser la température intérieure 2°C aux heures les plus chaudes de l'été. Ainsi la maison est toujours maintenue en dessous de 27°C. Elle baisse de 1,5°C supplémentaire en appliquant un taux de 2,5 volume/heure. La maison passe alors rarement la barre des 25°C. La

baisse de température n'est pas proportionnelle à l'augmentation de débit. En effet, le rendement de l'échange baisse avec l'augmentation de débit augmentant la température de sortie, et à mesure que la température de la maison baisse la puissance de froid apportée diminue. En implantant plusieurs puits on multiplierait le débit tout en conservant un bon rendement.

En hiver, ils permettent d'économiser 48% de l'énergie du poste de renouvellement d'air. Ce chiffre est probablement un peu surévalué puisque le modèle ne semble pas tenir compte de l'incidence des puits canadiens sur la température du sol. L'expérience précédente qui le prenait en compte donnait plutôt 40%. Globalement ce chiffre se généralise assez bien. En effet la terre joue le même rôle de tampon thermique en hiver fournissant un air tempéré de manière similaire.

En ce qui concerne la mise hors-gel, elle nécessite d'augmenter le débit d'air traversant les puits pendant les périodes les plus froides en passant d'un taux de renouvellement de 0,7 volume/heure à 1,5 volume/heure. (Au delà, l'amélioration est faible).

Cette étude confirme les résultats de la précédente en ce qui concerne l'hiver. En outre, elle montre la capacité des puits canadiens à abaisser la température dans la maison de plusieurs degrés en été et suggère des pistes pour améliorer encore l'efficacité du système comme augmenter le débit ou encore le nombre de puits. En outre, l'efficacité des puits en été à taux de renouvellement égal dépendra également de la conception de la maison. Mieux celle-ci sera isolée, meilleur sera le rafraîchissement.

#### **IV-5-3-3-Expérimentation de Castanet**

Cette étude est antérieure à celles présentées précédemment. Elle s'accorde aux deux autres sur les points étudiés. Son originalité consiste à s'intéresser aux problèmes de condensation dans les puits. Pendant la période étudiée l'humidité spécifique mesurée en entrée de puits est très proche de celle mesurée en sortie de puits ce qui suggère l'absence de condensations dans le puits et concorde avec les prévisions théoriques. Le modèle aux différences finies construit est assez simple et est validé expérimentalement. Il est donc envisageable de l'adapter sur Pléiades Comfie [Trombe, 1991].

#### **IV-5-3-4-INSA : les puits provençaux:« étude et méthode de dimensionnement »**

Ce document a été réalisé par des étudiants lors d'un projet de fin d'étude sous le tutorat de Monsieur Trombe [INSA de Toulouse. Kunetz et Lefebvre, 2004]. Il constitue une bonne

introduction au puits canadiens grâce à son approche synthétique. Au terme de ce travail les étudiants ont réalisé un logiciel permettant l'évaluation des puits canadiens en temps réel.

Le second chapitre est consacré à l'élaboration du modèle implémenté dans le logiciel. Il donne la température de sortie du puits en fonction de sa profondeur, de la température du sol, de son diamètre et du débit d'air. Il constitue donc un bon outil pédagogique.

Cette étude montre la nécessité de prendre en compte l'ensoleillement dans le calcul de la température du sol en profondeur. Le modèle développé montre qu'à 2 mètres de profondeur la différence de température entre un terrain ensoleillé et un terrain à l'ombre est de 4°C en été et de 2°C en hiver alors que les courbes de simulation et de mesure correspondent bien lorsqu'on le prend en compte. Ainsi, suivant la situation du terrain le pouvoir de rafraîchissement du puits variera dans des proportions importantes.

### **-Conclusion générale sur l'ensemble de la bibliographie fournie par Alain Trombe**

Le travail de l'INSA donne un éventail assez large de l'ensemble des approches théoriques et expérimentales possibles sur les puits canadiens. Elle permet de définir de manière assez précise les dimensions typiques d'un puits ainsi que la plage de fonctionnement idéale [Thiers, 2008]. Elle montre la pertinence du système à la fois pour le rafraîchissement en été et pour le préchauffage de l'air de ventilation en hiver.

En outre, elle propose deux types de modèles adaptés : un modèle analytique et un modèle numérique aux différences finies dont on pourra s'inspirer pour l'implémentation des puits canadiens dans Pléiades.

### **IV-5-3-5- Outil de calcul de l'échangeur thermique air/sol : GAEA**

Le logiciel GAEA est développé par l'université de Siegen [Benkert et al, 2000] : Il permet d'évaluer les apports thermiques de puits canadiens au bâtiment en fonction de leur diamètre, leur longueur, la profondeur à laquelle ils sont disposés ainsi que le type de terre dans lequel ils sont placés.

Ce document présente la méthode de calcul employée par les concepteurs du logiciel GAEA. Les principales approximations du modèle sont les suivantes. Les puits canadiens n'interagissent pas entre eux ce qui empêche de tester des nappes de puits canadiens. Ils n'influent pas sur la température de la terre. Cela peut fausser les résultats en particulier lorsque les débits parcourant les puits sont importants. Le modèle ainsi construit permet l'obtention d'un ordre de grandeur du potentiel de chaud et de froid que l'on peut obtenir. Cependant, la comparaison avec une expérience mettant en jeu un puits canadien montre la nécessité de traiter

le problème en temps réel et de manière couplé au bâtiment. Les concepteurs prévoient de perfectionner le modèle et de prendre en considération le lien avec le bâtiment. Il peut donc être intéressant de suivre l'évolution de leur projet.

#### **IV-5-3-6-Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : Mesure in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique**

Cette étude est une thèse universitaire réalisée sur sept ans. Elle traite des échangeurs air-sol en général et des puits canadiens en particulier dans la dernière partie. L'intérêt se portera plus particulièrement sur les puits canadiens mais il pourra aussi se tourner vers d'autres systèmes en rapport avec ces derniers [Hollmuller, 2002].

La première partie décrit l'ensemble des projets étudiés. Les projets relatifs à l'utilisation de puits canadiens serviront pour la validation du modèle théorique. Elle présente également des expériences originales où le sous-sol du bâtiment est utilisé comme un échangeur air-sol pour le rafraîchissement du bâtiment en été. Ce type de dispositif est très avantageux en termes de coût et très efficace, il mérite donc d'être envisagé en priorité sur tout autre système de rafraîchissement.

La partie centrale de la thèse est consacrée au calcul analytique des échangeurs air-sol. Elle étudie deux géométries : la géométrie plane et la géométrie cylindrique (puits canadiens). La réponse du sol est évaluée dans le cas d'une excitation journalière ou annuelle. Les résultats du calcul permettent le dimensionnement des puits canadiens en fonction de leur utilisation. Le dimensionnement est effectué à partir d'un objectif d'amortissement de l'oscillation entre l'entrée et la sortie du puits d'un facteur 7,4.

Dans le cas d'une utilisation classique des puits canadiens, c'est à dire sur un cycle annuel, les règles de dimensionnement établies (qui donnent la valeur du rapport entre la surface d'échange et le débit d'air passant dans le puits en fonction de la vitesse de l'air parcourant les puits) aboutissent approximativement à la même configuration pour les puits canadiens que celle trouvée dans les travaux de Monsieur Trombe. Il y a donc concordance entre les deux approches. L'intérêt du calcul analytique effectué par Pierre Hollmuller est qu'il permet d'étudier d'autres configurations et modes de fonctionnement pour les puits canadiens. Le fonctionnement du puits sur un cycle journalier est fondé sur le même principe que la ventilation nocturne. Il est particulièrement intéressant puisque la longueur de diffusion journalière est réduite à une trentaine de centimètres. Ainsi, les puits peuvent être placés à cette profondeur et espacés au maximum d'une soixantaine de centimètres, ce qui réduit fortement le coût du terrassement. Cette solution n'est cependant valable que pour le rafraîchissement d'été

et dans les régions où les différences de température entre le jour et la nuit sont assez importantes. Pour un cycle journalier, la valeur du rapport entre la surface d'échange et le débit d'air passant dans le puits est divisée par deux. Il faut donc réduire le diamètre du puits de 1,41 (égal à  $\sqrt{2}$ ) pour conserver le même amortissement.

La méthode des éléments finis a été choisie pour la modélisation numérique, implémenté sur TRNSYS comme celui développé par Alain Trombe pour l'expérience de l'Ariège. Il constitue en outre un module du logiciel TRNSYS et peut ainsi être couplé à n'importe quel bâtiment modélisé sous ce logiciel. Le modèle numérique ainsi construit est validé à la fois de manière théorique par comparaison avec la solution analytique et par deux expériences : Caroubier où l'écart entre le modèle et les mesures est de 3% et Schwerzenbacherhof où l'écart est de 4% en charge estivale et de 10% en décharge hivernale. Les résultats de la seconde expérience sont cependant à prendre avec précaution à cause de possibles infiltrations d'eau dans les puits canadiens induisant des échanges latents non pris en compte par le modèle donnant les résultats ci-dessus.

En conclusion, l'approche adoptée dans cette thèse apporte de nombreux éclairages sur les puits canadiens en choisissant un cadre théorique large et grâce à l'exploitation de plusieurs expériences et du modèle numérique construit. Il donne des critères de choix entre les puits canadiens et d'autres systèmes de rafraîchissement ou de préchauffage. Il fournit également des règles de dimensionnement simple des puits canadiens (règle du pouce) et de leur emplacement en fonction du type d'utilisation et du lieu d'implantation.

Ainsi, le choix d'un puits canadien peut notamment avoir une incidence sur la conception du bâtiment lui-même et sur le dimensionnement du système de chauffage dans les maisons à basse consommation énergétique. Le fait d'utiliser des puits canadiens permet par exemple de reporter l'inertie du bâtiment dans la terre et donc d'économiser de la matière. Il réduit la puissance de chauffage nécessaire et permet d'envisager dans le cas d'un couplage en série avec un échangeur double-flux de se diriger vers une maison sans système de chauffage utilisant simplement les apports internes des appareils et des personnes. Enfin, il faut étudier le couplage des puits canadiens avec d'autres techniques de rafraîchissement possibles en été comme la ventilation nocturne ou la mise en place de protections solaires. La régulation est aussi un thème à traiter plus complètement.

#### **IV-5-3-7- rafraîchissement et préchauffage par tubes enterrés**

Cette étude est globalement intégrée dans la thèse citée précédemment malgré une présentation différente. Une étude économique montre la compétitivité des puits canadiens par rapport à un système de climatisation classique (prix du kWh froid du même ordre). Il faut

cependant noter que dans l'expérience étudiée la profondeur d'enfouissement des tubes est réduite à 50 centimètres. Le coût d'un puits canadien usuel est donc plus cher. Il présente cependant l'intérêt d'être écologique et discret ce qui n'est pas le cas d'une climatisation classique. La compétitivité économique n'est par contre pas atteinte dans le cas du simple préchauffage (le kWh du puits canadien étant alors environ 2 fois plus cher que celui du gaz). L'étude économique étant menée pour une expérience ponctuelle ces chiffres sont considérés comme une indication. [Hollmuller et Lachal, 2001].

#### **IV-5-3-8-Stockage de chaleur dans le sol**

Les puits canadiens ont en général un rôle de tampon thermique : ils profitent de l'inertie de la terre pour lui soutirer des calories en hiver et des frigories en été.

Il est possible d'augmenter l'efficacité des puits canadiens en augmentant artificiellement la température de la terre avant l'hiver et en la diminuant de même avant l'été. Il suffit de faire passer de l'air chaud dans les puits en automne. En effet ils ne servent alors pas à la ventilation du bâtiment. Le même principe est appliqué au printemps lorsque les températures extérieures sont assez basses. La recherche de document sur le stockage de chaleur vise à trouver des pistes pour traiter cette nouvelle problématique [Bernner et Hahne, 2000]. Les principaux thèmes qui ont été abordés dans ce sens sont: le stockage de chaleur dans le sol, dans les nappes phréatiques, les pompes à chaleur et les matériaux à changement de phase. Les stocks utilisent en général des pompes à chaleur. Lorsqu'ils ne sont pas isolés thermiquement ils doivent être de grande taille environ 20000 m<sup>3</sup>. Dans le cas de stock de chaleur de taille inférieure, on doit veiller à prendre un isolant étanche. En effet, au contact de la terre un isolant classique absorbe l'humidité. Son efficacité peut alors être divisée par dix.

Cet état de l'art nous permet de définir les différents paramètres qui interviennent sur le dimensionnement et la modalisation d'un puits canadien.

#### **IV-5-4- Caractéristiques physiques du puits provençal**

Le puits provençal est constitué de quatre éléments principaux :

- Entrée d'air neuf,
- Le conduit,
- Le système d'évacuation des condensats, et
- Un ventilateur et un système de régulation du puits.

L'analyse de puits canadien fait intervenir une série de paramètres physiques à la fois du sol et de l'air, ainsi que le coefficient d'échange thermique à l'interface des deux (échange convectif air/tube).

#### IV-5-4-1-Caractéristiques thermiques du sol

Le transfert de chaleur s'inscrivant dans le contexte plus général des échanges énergétiques qui relèvent essentiellement de trois types de processus physique, soit les échanges sous forme d'énergie radiative, d'énergie thermique (par conduction et par convection et d'énergie latente [Musy et Soutter ,1991].

Les principaux paramètres qui interviennent dans la description du comportement thermique d'un sol sont ceux qui permettent de le caractériser, sur le plan quantitatif et capacitif. Ces grandeurs dépendent directement des propriétés thermiques spécifiques des divers composants du sol, si bien qu'elles varient notamment, pour un même sol, avec la répartition du fluide dans la porosité, soit avec la teneur en eau. Les propriétés thermiques des sols sont conditionnées par les caractéristiques de leur texture et de leur structure [ Musy et Soutter, 1991].

##### a) Capacité calorifique

La capacité thermique  $C_s$  d'un sol s'exprime par une moyenne pondérée des capacités calorifiques respectives de ses constituants (minéraux, matière organique, air, eau) [Pierre Hollmuller, 2002] :

$$C_s = \sum_i x_i \cdot \rho_i \cdot C_i$$

Où  $X_i$ ,  $\rho_i$ ,  $C_i$  représentent respectivement la teneur (en m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> total), la masse volumique et la capacité calorifique d'un des constituants. Ainsi, comme l'eau et la matière organique se distinguent par une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux, un sol humide emmagasinerà mieux la chaleur qu'un sol sec, effet parfois utilisé pour accroître la performance d'échangeurs air/sol [Alvarez et al. 1992].

matière	masse volumique $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	cap. calorifique $c$ kJ/K.kg	cap. calor. vol. $\rho c$ MJ/K.m <sup>3</sup>	conductivité $\lambda$ W/K.m
minéraux (moyenne)	2.65 10 <sup>3</sup>	0.80	2.10	2.90
matière organique	1.30 10 <sup>3</sup>	1.90	2.47	0.25
eau	1.00 10 <sup>3</sup>	4.20	4.20	0.585
glace	0.92 10 <sup>3</sup>	2.10	1.93	2.20
air	1.25 10 <sup>3</sup>	1.00	1.25	0.023

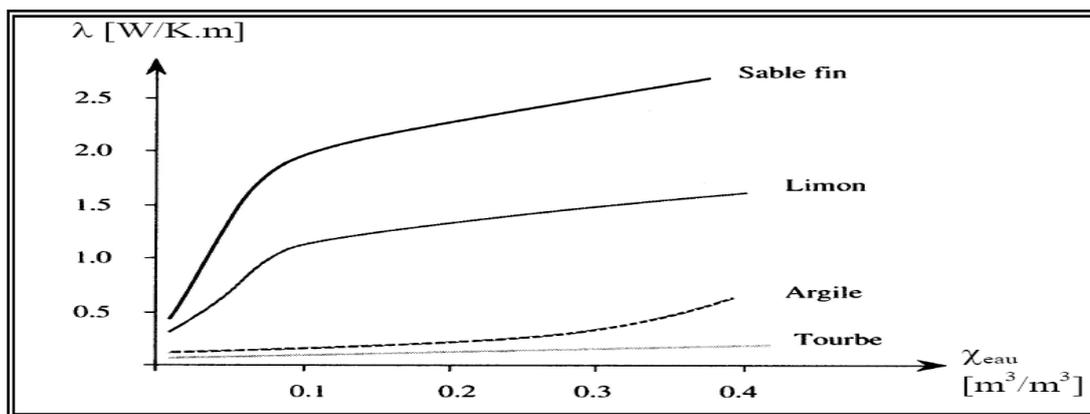
**Tableau IV-02** : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol  
(Source : Hollmuller, 2002)

Ce paramètre représente l'inertie thermique du sol et par conséquent influe aussi sur la température du sol non-perturbé (atténuation du signal et déphasage lorsque la capacité thermique est élevée). Par contre, l'influence de ce paramètre sur l'efficacité de l'échange est ici

beaucoup moins marquée. Un sol à forte inertie sera donc toujours préférable, quelle que soit la saison (été ou hiver) [Hollmuller, 2002].

### b) Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition (teneur en matières minérales et organiques, mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules (ponts d'eau très conducteur) ainsi que de sa teneur en air (faiblement conducteur). Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide [Hollmuller, 2002].



**Figure IV-38:** Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau (Source : Hollmuller, 2002)

Ce paramètre joue à la fois sur la profondeur de pénétration du signal thermique à l'intérieur du sol et sur le comportement dynamique des deux mailles de sol. Par conséquent, il modifie l'atténuation de l'amplitude, le déphasage du signal de température du sol et l'efficacité globale de l'échangeur. Lorsque la conductivité du sol est faible, l'amplitude de variation de la température en sortie d'échangeur est plus élevée, ce qui se traduit par une perte d'efficacité de l'échangeur. Par contre, il est important de noter qu'un sol à faible conductivité isole mieux les tubes de l'échangeur des conditions extérieures, ce qui limite l'amplitude de variation de la température du sol et la température atteinte en été en sortie d'échangeur. Finalement, c'est cette propriété qui semble préférable pour réduire la surchauffe en été [Thiers, 2008].

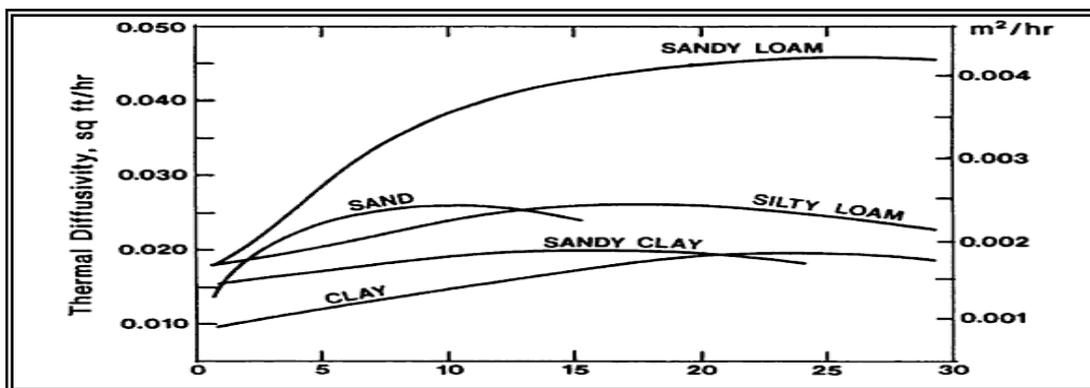
### c) La diffusivité et l'humidité du sol

Les capacités calorifiques et la conductivité du sol ont un impact important sur l'efficacité du système. Ces caractéristiques dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein. La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau.

L'eau possédant une capacité et une conductivité thermique supérieure à celles des autres constituants du sol, un sol humide est plus inertielle qu'un sol sec et transmettra plus facilement

sa chaleur ou sa fraîcheur à l'air dans les canalisations du puits. Cet effet peut être mis à profit pour augmenter la performance des échangeurs thermiques air/sol. Il suffit alors d'humidifier le sol par arrosage pour accroître ses capacités de stockage thermique et les échanges avec l'air dans le puits [Atif, 1987].

La diffusivité thermique d'un sol est élevée, la chaleur est rapidement propagée ainsi entre la surface et les couches plus profondes. L'eau est caractérisée par une diffusivité thermique élevée, donc la chaleur se propage à des couches plus profondes [Trombe, 1991].



**Figure IV-39** : Effet de l'humidité du sol sur la diffusivité thermique (Source: Lester et al, 1987)

**d) La réflectivité de surface de sol (l'albedo)**

La part du rayonnement solaire absorbé par la surface du sol dépend de la nature de la surface du sol. Pour un sol très absorbant (asphalte), la température du sol sera plus élevée que si le sol est peu absorbant (revêtement réfléchissant), en particulier lors des périodes où le rayonnement solaire est important (été). Par contre, là encore, l'efficacité moyenne de l'échange est très peu affectée par ce paramètre [Trombe, 1991].

Surface de sol	Albédo
Surface d'eau	0.03 à 0.1
foret	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs de prairies	0.1 à 0.3
Sol nu	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

**Tableau IV-04** : Valeur de l'albedo pour différentes surfaces (Source : Musy et Soutter, 1991)

En pratique, ce paramètre présente généralement une valeur moyenne peu variable d'une installation à l'autre : la surface du sol est souvent très absorbante (gazon, sol nu, gravier, béton ou asphalte) [Trombe, 1991].

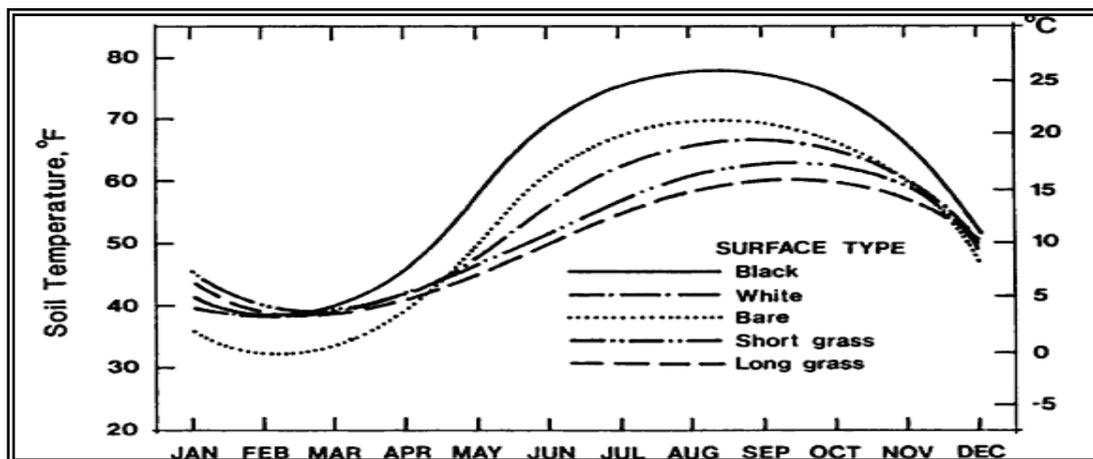


Figure IV-40: Effet de la surface du sol sur les variations annuelles de la température (Source: Lester et al, 1987)

#### IV-5-4-2-Les propriétés physiques du tube

##### a) Le nombre et le diamètre des tubes

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la **section totale** de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation.

En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 cm et 20 cm, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille [Dibowski, 2005]. Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur [Thiers, 2008].

##### b) La longueur des tubes

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. En première approximation, le profil de température de l'air dans les tubes est asymptotique. Ainsi, au-delà d'une certaine longueur, le rallongement des tubes n'apporte aucune amélioration de l'échange. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur, liée à la longueur caractéristique de l'échange thermique,  $l$ , qui peut être obtenue en confrontant le surcoût économique de l'échangeur (constant avec la longueur) à l'économie d'énergie apportée par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'employer plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) plutôt qu'un ou deux tubes beaucoup plus longs [Thiers, 2008].

**c) La distance entre tubes**

Les fonctions de stockage et d'amortisseur thermique du sol sont assurées par le volume de sol situé tout autour de chaque canalisation. L'épaisseur de sol concernée est proportionnelle à la profondeur de pénétration du signal thermique, qui dépend de la période de variation des phénomènes mis en jeu [Hollmuller, 2002]. Ainsi, si la distance entre deux tubes est du même ordre de grandeur ou inférieure à la profondeur de pénétration, la température de la portion de sol située entre ces tubes est influencée simultanément par ces deux tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol [Thiers, 2008].

L'influence de la distance entre les tubes sur les performances de l'échangeur est peu abordée dans la littérature. Pourtant, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol. D'après Hollmuller, une distance de 40 cm sera suffisante pour maintenir l'effet de stockage thermique pour des variations journalières. Par contre, un stockage thermique saisonnier nécessiterait un espacement de l'ordre de 3 m, qui n'est généralement pas envisageable en pratique [Thiers, 2008].

**d) La profondeur d'enfouissement des tubes**

Pour un échangeur air-sol, le sol joue le rôle d'isolant et de tampon thermique entre l'atmosphère et les canalisations enterrées. La profondeur d'enfouissement influe sur la qualité de cette isolation. Hollmuller montre que les variations de température de l'air extérieur sont d'autant plus amorties et déphasées par le sol que la profondeur est grande. Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne dépend quasiment plus des conditions atmosphériques [Thiers, 2008].

Pour tirer partie du déphasage journalier, une profondeur de 40 cm est suffisante, tandis que pour un déphasage saisonnier, la profondeur minimale d'enfouissement requise est de 2 m. Au-delà, l'augmentation de la profondeur accroît les contraintes réglementaires (sécurisation du chantier) et les coûts de réalisation plus que l'économie d'énergie marginale apportée [Thiers, 2008].

**e) La rugosité intérieure des tubes**

La rugosité intérieure des tubes favorise le transfert thermique par convection en créant de la turbulence, cependant elle favorise aussi les pertes de charges hydrauliques le long de chaque tube [Trombe, 1991].

Des pertes de charge élevées sont indésirables car elles entraînent un surdimensionnement des systèmes de ventilation et des pertes énergétiques supplémentaires. De plus, les irrégularités

de l'intérieur des tubes favorisent la stagnation d'eau condensée, ce qui peut dégrader à terme la qualité de l'air ventilé (développement de micro-organismes). L'intérieur des tubes doit donc être le plus lisse possible. Ainsi, une légère pente (2%) de l'ensemble des tubes permet l'évacuation de l'eau condensée sans intervention extérieure [Trombe, 1991].

#### **f) La nature des tubes**

La chaleur massique et la conductivité thermique du matériau constitutif des tubes sont généralement négligées. En effet, la faible épaisseur des canalisations réduit fortement la capacité et la résistance thermique globale des tubes, qui influent alors très peu sur le comportement thermique de l'échangeur [Thiers, 2008].

### **IV-5-4-3-Les caractéristiques du flux d'air**

#### **a) Le débit d'air total**

Le débit total de l'air circulant dans l'échangeur doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces à ventiler. Le régime de ventilation peut varier selon le mode de fonctionnement (réduit en préchauffage, plus élevé en rafraîchissement). La détermination du débit d'air total maximal constitue le premier paramètre de dimensionnement de l'échangeur.

Le volume du bâtiment combiné aux débits réglementaires est déterminant pour connaître le débit d'air nécessaire. En été, un rafraîchissement significatif peut être obtenu avec des débits faibles : de l'ordre de 2 vol/h dans un très grand volume (atrium, halle...), de l'ordre de 4 à 6 vol/h dans des espaces intermédiaires (classe, restaurant..), et de 4 à 8 vol/h dans des pièces ou des logements [Thiers, 2008].

#### **b) La vitesse de l'air dans les tubes**

La vitesse de l'air ne constitue pas un paramètre indépendant, puisqu'elle découle directement du choix des paramètres précédents. Néanmoins, elle impose le type d'écoulement (laminaire, turbulent) et influe donc non seulement sur la valeur du coefficient d'échange convectif entre l'air et les tubes, mais aussi sur les pertes de charges mécaniques qui doivent être compensées par le ventilateur. Afin de limiter les pertes de charge, cette vitesse est le plus souvent maintenue en deçà de 3 à 4 m.s<sup>-1</sup> [Thiers, 2008].

#### **c) L'humidité de l'air**

Les taux d'hygrométrie de l'air extérieur et de l'air extrait ne sont pris en compte que par les modèles intégrant les échanges latents [Hollmuller, 2002]. En effet, pour les climats tempérés, les phénomènes de condensation et l'évaporation de l'eau à l'intérieur des tubes ne se produisent que de manière épisodique. Sur une année, ces phénomènes sont donc peu fréquents

et leur influence sur le comportement de l'échangeur reste très limitée dans le temps. Sous d'autres climats, ces échanges peuvent être importants. Par exemple, en climat tropical humide, un puits canadien implanté à 3 m de profondeur permet d'abaisser la température de 6 °C et de déshumidifier sensiblement l'air intérieur, ce qui participe aussi à l'amélioration du confort thermique [Kemajou, 2006].

#### IV-6-4-4-Echange convectif air/tube

Un des paramètres fondamentaux des échangeurs air/sol est le coefficient d'échange convectif entre le flux d'air et le tube. Il reflète, de façon macroscopique, les échanges thermiques qui ont lieu entre le gros du flux et la couche limite qui se développe à la surface du tube. De façon générale, ce coefficient dépend tant de la géométrie du problème étudié que de facteurs intrinsèque au fluide (tels que la viscosité, la densité ou la conductivité thermique), ou au tube (tel la rugosité), ouvrant la porte à une myriade de cas de figure différents. Afin d'en synthétiser l'étude, il est toutefois possible, par réduction appropriée des grandeurs en jeu, de ramener les problèmes convectifs à une série de cas standards, que l'on peut traiter ou du moins approximer à partir de lois physiques fondamentales [Incropera et De Witt, 1990]. En particulier, pour un même type de géométrie (dans le cas présent un écoulement interne dans un tube cylindrique) mais pour différents fluides, on exprime en général le coefficient d'échange convectif  $h_a$  en le réduisant par rapport au coefficient de transfert par conduction, calculé pour une épaisseur d'air équivalente au diamètre du tube  $d$  :

$$Nu = \frac{h_a \cdot d}{\lambda_a}$$

où  $\lambda_a$  est le coefficient de conduction de l'air (sans convection). Ce rapport, appelé nombre de Nusselt, est lui-même évalué en fonction de deux autres nombres adimensionnels, à savoir le nombre de Prandtl  $Pr$  (rapport entre viscosité cinématique et diffusivité thermique) et le nombre de Reynolds  $Re$ . Pour de l'air. Le nombre de Reynolds dépend quant à lui tant de la viscosité cinématique  $\gamma_a$  (relativement stable), que de la vitesse du fluide  $v$  et du diamètre du tube  $d$  :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma_a}$$

si bien qu'il représente le paramètre majeur de notre problème

Bien que de forme générique similaire, de par la littérature une pléthore de modèles différents relie ces paramètres entre eux. Nous retiendrons quant à nous une version corrigée du modèle de Von Hausen [Gnielinski, 1975], qui a le mérite d'une plage de validité relativement étendue

vers les petites vitesses et/ou petits diamètres ( $Re > 2'300$ ). Sa formulation complète est de la forme :

$$Nu = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left[ \frac{T_a}{T_t} \right]^{0.45}$$

Le coefficient d'échange convectif vaut donc :

$$h = 0.014 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4} \cdot \frac{\lambda_{air}}{2 \cdot r_{int}}$$

Où les températures de l'air  $T_a$  et du tube  $T_t$  sont donnés en K. Dans la pratique, le rapport entre diamètre et longueur du tube sera en général inférieur à 0.01 et le différentiel d'air-tube se situera en dessous des 10 K.

Cumulés, les deux termes correctifs y relatifs se situeront ainsi en dessous des 2% et pourront être négligés.

Une étude paramétrique du nombre de Nusselt ainsi calculé (puis ramené sous sa forme dimensionnelle de coefficient d'échange), montre l'importance primordiale de la vitesse du flux : celle-ci induit un accroissement quasi-linéaire de l'échange thermique, d'autant plus important que le rayon est faible (et que le gros du flux, au centre, interagit plus fortement avec la surface du tube).

#### IV-5-5- Modélisation et dimensionnement d'un puits provençal

Au moins une quinzaine d'études abordent la technologie des échangeurs air-sol, soit en tant que sujet principal [Mihalakakou et al. 1994 ; Benkert et al. 1997 ; Bojić et al. 1997 ; Benkert et Heidt 2000 ; Kunetz et Lefebvre 2001 ; Hollmuller 2002 ; De Paepe et Janssens 2003 ; Dibowski 2003 ; Zweifel 2004 ; Al Ajmi et al. 2005 ; Dibowski 2005a, 2005b ; Ghosal et Tiwari 2006 ; Badescu 2007], soit en tant qu'élément d'une étude plus vaste sur le rafraîchissement de bâtiments [Serres et al. 1996 ; Bojić 2000 ; Badescu et Sicre 2003]. Les structures à rafraîchir sont soit des bâtiments, soit des serres [Gauthier et al, 1997 ; Hollmuller et Lachal, 2001 ; Ghosal et Tiwari ,2006]. La synthèse des principales approches rencontrées dans la littérature , a permis d'élaborer les grandes lignes du modèle développé, à travers l'identification des principales caractéristiques des échangeurs air-sol et de leurs ordres de grandeur, Ces paramètres sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur air-sol, et par conséquent pour sa modélisation.

Le modèle cité ci dessus, développé en collaboration avec l'INSA de Toulouse, s'appuie sur ces travaux, spécialement. Ce model considère le puits canadien, comme tout échangeur thermique, qui met en contact thermique deux sources de températures différentes. Dans ce cas,

l'une de ces sources est l'air qui circule dans les tubes et l'autre est le sol placé au contact des tubes. Durant la saison chaude, la source chaude est l'air et la source froide le sol. Ceci s'inverse durant la saison froide. La température de l'air dans les tubes et la température du sol au contact des tubes constituent donc les deux variables d'entrée de l'échangeur. La température du sol au contact des tubes évolue donc au cours de l'échange thermique. L'expression « au voisinage » rappelle que l'énergie reçue ou cédée par le sol est transmise jusqu'à une distance indéterminée des tubes au-delà de laquelle, la température du sol n'est plus influencée par l'échangeur, c'est la température du sol non-perturbé.

Dans le cadre du présent modèle, l'échangeur est représenté par les tubes et le volume de sol où l'échange est considéré. En surface de ce volume, la température du sol non perturbé est imposée, constituant ainsi, avec la température de l'air en entrée d'échangeur, une condition aux limites.

La température de l'air en entrée d'échangeur correspond à la température de l'air extérieur. Elle est facilement mesurable ou accessible à partir de bases de données météorologiques horaires. Par contre, la température du sol non perturbé ne peut être connue sans l'usage d'un dispositif de mesure difficile à mettre en œuvre (sonde thermique placée à la profondeur d'enfouissement des tubes). Il n'existe aucune base de données à même de fournir cette température, c'est pourquoi une modélisation est nécessaire.

Ainsi, la modélisation de l'échangeur air-sol -développé par Stéphane Thiers dans le cadre de son travail de thèse (2008)- qui s'articule à la réalisation de deux modèles distincts :

- Un modèle thermique de sol, capable de calculer, à tout instant et en tout point, la température du sol non perturbé ;
- Un modèle thermique d'échangeur air-sol, calculant la température de l'air en sortie d'échangeur en fonction de la température de l'air en entrée d'échangeur et de la température du sol non perturbé calculée en limite du volume de sol modélisé par le modèle thermique de sol.

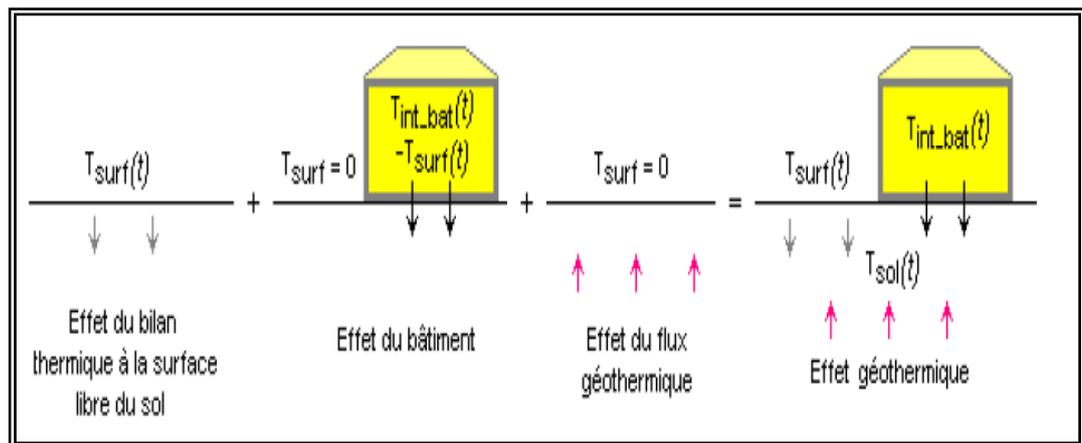
#### **IV-5-5-1-Structure du modèle thermique de sol**

Le modèle de sol envisagé ici a été largement utilisé dans la littérature [INSA, 2004; Williams et al, 1977; Mermoud, 2001; Benkert et al, 2000]. Il consiste très simplement à considérer le sol comme un massif semi-infini, excité en surface par un signal de température sinusoïdal. En effet, ce modèle présente des solutions sinusoïdales de même période que l'excitation mais dont les amplitudes, valeurs moyennes et déphasages varient en fonction de la

profondeur considérée. Globalement, plus la profondeur est grande et plus le signal sinusoïdal est amorti et retardé.

À la surface du sol, les échanges thermiques sont multiples.

- La conduction dans le sol du signal de température provenant de la surface du sol (effet des conditions atmosphérique,
- La conduction du flux thermique provenant d'un bâtiment situé à proximité de la portion de sol considérée (influence du bâtiment sur la température du sol)
- La conduction d'un flux thermique en provenance du sous-sol (flux géothermique)



**Figure IV-41 :** Superposition des trois termes du modèle thermique de sol  
(Source : Thiers , 2008)

Chacun de ces phénomènes est associé à des conditions aux limites spécifiques. Une étude plus approfondie de ce bilan thermique en surface du sol, s'appuyant sur l'étude de Mihalakakou et al. (1997) et le cours de Mermoud (2001), a permis de ranger les différentes contributions par ordre d'importance : d'abord, l'échange convectif avec l'air, puis les échanges radiatifs, et enfin les échanges latents. Si l'on néglige, en première approximation, la contribution du rayonnement et des échanges latents, on constate que la température du sol à la profondeur du puits canadien ne correspond pas du tout à la température réelle. En conséquence, la contrainte en surface se réduisant au seul échange avec l'air est insuffisante.

Le bilan thermique retenu nécessite donc la connaissance de la température de l'air extérieur et du flux de rayonnement solaire global incident à la surface du sol. Là encore, une approximation est nécessaire. En effet, le modèle de sol (massif semi-infini) n'est utilisable que pour une sollicitation (température de la surface du sol) décomposée en somme de fonctions sinusoïdales. En conséquence, le bilan thermique doit lui-même être réalisé à partir de variables oscillant sinusoïdalement. Dans un premier temps, il sera donc nécessaire de réaliser une mise

en forme, nécessairement simplificatrice, des courbes de température de l'air extérieur et du flux de rayonnement solaire global incident à la surface du sol.

À l'intérieur de la couche de sol, les échanges conductifs sont prépondérants sur les échanges convectifs (infiltration d'eau, nappe phréatique) et radiatifs (milieu dense et opaque). Eux seuls seront pris en considération par le modèle de massif semi-infini.

Enfin, en première approximation, la puissance géothermique, c'est-à-dire provenant du manteau terrestre, sera négligée. Comme on le verra plus loin, cette puissance pourra être ajoutée ultérieurement au présent modèle.

#### - Expression des sollicitations

Le modèle de propagation de la chaleur par conduction dans un massif semi-infini propose une solution analytique lorsque la température en surface du massif est sinusoïdale. En conséquence, toutes les sollicitations du problème doivent être ramenées à des constantes ou à des fonctions sinusoïdales du temps.

On présentera ici la méthode retenue à cet effet, appliquée à la température de l'air extérieur. Le même raisonnement est réalisé sur le flux de rayonnement solaire global incident à la surface du sol.

#### - Objectif

Il s'agit d'extraire, à partir de températures mesurées, un signal de forme sinusoïdale. C'est-à-dire que la température de l'air extérieur,  $T_e$ , sera idéalement exprimée sous la forme :

$$T_e(t) = \bar{T}_e + A_e \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_e)$$

où la pulsation  $\omega$  représente la pulsation annuelle. Elle vaut :

$$\omega = \frac{2\pi}{365j} = \frac{2\pi}{8760h}$$

Les paramètres constants à évaluer sont donc la température moyenne ( $T_e$ ), l'amplitude ( $A_e$ ) et le déphasage ( $\varphi_e$ ).

#### - Extraction des paramètres

Différentes méthodes peuvent être utilisées (moindres carrés, identification, analyse spectrale), cependant, l'objectif étant ici d'extraire le fondamental d'un signal réel bruité (les températures mesurées), la plus adaptée reste l'analyse spectrale de type Fourier.

Cette méthode permet d'exprimer  $T_e(t)$  sous la forme d'une somme de fonctions sinusoïdales :

$$T_e(t) = \bar{T}_e + \sum_{n=1}^N a_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^N b_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t)$$

Soit, en se limitant au fondamental (N=1)

$$N=1 : T_e = \bar{T}_e + a_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + b_1 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

La température moyenne,  $T_e$ , est identifiée à la température moyenne de l'air extérieur par simple intégration des données de température fournies par la base de données météorologique sur une année.

$$\bar{T}_e = \frac{1}{1 \text{ an}} \cdot \int_0^{1 \text{ an}} T_e(t) \cdot dt \text{ soit à partir des données horaires : } \bar{T}_e = \frac{1}{8760} \cdot \sum_{i=1}^{8760} T_{e \text{ mesuré } (i)}$$

Les coefficients de Fourier,  $a_1$  et  $b_1$ , se calculent, à partir des données horaires de température ( $T_e$ -mesuré(i)), comme suit :

$$a_1 = \frac{2}{8760} \cdot \sum_{i=1}^{8760} T_{e\text{-mesuré}(i)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{8760} \cdot i\right)$$

et

$$b_1 = \frac{2}{8760} \cdot \sum_{i=1}^{8760} T_{e\text{-mesuré}(i)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{8760} \cdot i\right)$$

Il est en suite facile d'exprimer  $T_e(t)$  sous la forme de l'équation (1) avec

$$A_e = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$$

Et

$$\varphi_t = \text{Arccos} \frac{a_i}{A_e}$$

La température de l'air extérieur est ainsi exprimée comme une fonction sinusoïdale.

Il faut noter que les harmoniques 2 et 3 se propagent aussi assez profondément dans le sol [Jacovides et al., 1996]. La prise en compte de l'un ou l'autre de ces harmoniques pourra constituer un raffinement du calcul dont l'intérêt reste à évaluer.

Le même type de calcul est réalisé à partir des données brutes de rayonnement global incident. Le flux résultant est donc de la forme :

$$\Phi = \bar{\Phi} + A_\theta \cdot \sin(\omega t - \varphi_{\neq \theta})$$

#### - Détermination de la température de la surface du sol

La température du sol à sa surface constitue la sollicitation qui sera imposée comme condition à la limite supérieure du sol considéré comme un massif semi-infini. Son évaluation est donc particulièrement déterminante, conditionne les résultats du calcul de la température du sol à toute profondeur. La détermination de cette température est réalisée à partir du bilan de puissance, exprimé à la surface du sol comme suit :

$$0 = CE_{eq} + SR - LE$$

Avec :

- $CE_{eq}$ , le flux d'échange global,
- $SR$ , le flux de rayonnement incident absorbé et
- $LE$ , le flux de chaleur latente cédé à l'atmosphère.

Ce bilan est fortement inspiré de celui de Mihalakakou et al. Il prend en compte – outre la température de l'air extérieur et le flux de rayonnement global incident – l'humidité du sol, la couverture du sol par la végétation, le vent, et l'humidité relative moyenne de l'atmosphère. Ce bilan est ainsi le seul qui prenne en compte toutes les spécificités du lieu d'implantation du puits canadien étudié.

La différence avec le bilan de Mihalakakou et al, réside dans le fait que les échanges convectifs et l'émission radiative du sol ont été regroupés ici sous la forme d'un flux  $CE_{eq}$  d'échange global, caractérisé par un coefficient d'échange global avec l'atmosphère,  $h_{eq}$ .

Les expressions détaillées des trois flux sont les suivantes :

$$CE_{eq}(t) = h_{eq} \cdot (T_a(t) - T_s(t))$$

$$SR(t) = (1 - \alpha) \cdot \Phi(t) = abs \cdot \Phi(t)$$

$$LE(t) = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot [(a \cdot T_s(t) + b) - r_a \cdot (a \cdot T_a(t) + b)]$$

Les paramètres sont tous issus de model de Mihalakakou et al, (sauf  $c$  qui a été ajouté pour une meilleure compréhension) :

- **abs** : la part du rayonnement global incident qui est absorbée par le sol  $abs=1-\alpha$  ( $\alpha$  : albédo de la surface du sol)
- **f** : un coefficient de correction empirique fourni par Mihalakakou et al et variant entre 0 et 1 en fonction du type de sol considéré et de l'état de sa surface.
- **$h_{sur}$**  : le coefficient d'échange par convection du sol avec l'air calculé par la formule :
- $h_{sur} = 0,5 + 1,2 v$
- **v** : la vitesse du vent au niveau du sol (m/s)
- **a, b** et **c** trois constantes :  $a = 103 \text{ Pa/K}$ ,  $b = 609 \text{ Pa}$ ,  $c = 0,0168 \text{ K/Pa}$
- **ra** : l'humidité relative de l'air

De plus, l'expression des solutions de ce bilan fait appel aux deux coefficients d'échange suivants :  $h_r = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot a \cdot r_a + h_{eq}$  et  $h_e = c \cdot f \cdot h_{sur} \cdot a + h_{eq}$

Ces paramètres sont tous considérés comme des valeurs moyennes annuelles. Dans les modèles présentés ici, ils ne varient pas durant l'année.

La température à la surface du sol résultant de ce bilan se présente finalement la forme suivante :

$$T_s(t) = \bar{T}_s + A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_a) + A_2 \cdot \sin(\omega t - \varphi_\Phi)$$

Où :

$$\bar{T}_s = \frac{(h_r - h_e) \cdot \frac{b}{a} + h_r \cdot \bar{T}_a + abs \cdot \bar{\Phi}}{h_e}, A_1 = \frac{(h_r \cdot h_e)}{h_e} \text{ et } A_2 = \frac{abs \cdot A_\Phi}{h_e}$$

### Modèle du massif semi-infini soumis à une excitation périodique

Considérant simplement un massif semi-infini dont l'excitation en surface est une température de forme sinusoïdale (du type de l'équation ), la température  $T_{sol}(z,t)$  du sol, au temps  $t$  et à la profondeur  $z$ , est de la forme :

$$T_{sol}(z, t) = \bar{T}_e + A_e \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi_e - \frac{z}{\delta}\right)$$

Où  $\delta$  représente la profondeur de pénétration du signal. Cette dernière est liée à la diffusivité thermique du sol

$$a_{sol} = \frac{\lambda_{sol}}{C_{sol} \cdot \rho_{sol}}$$

et à la période du signal d'entrée  $\omega$ , par la relation :

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot a_{sol}}{\omega}}$$

Physiquement, cette profondeur de pénétration indique la profondeur où l'amplitude d'un signal de température surfacique périodique, de pulsation  $\omega$ , est atténuée d'un facteur  $e^{-1} \approx 0,367$ .

À partir de la température en surface du sol (2), la température du sol prend la forme

$$T(z, t) = \bar{T}_s + A_1 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi_a - \frac{z}{\delta}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \sin\left(\omega t - \varphi_\Phi - \frac{z}{\delta}\right)$$

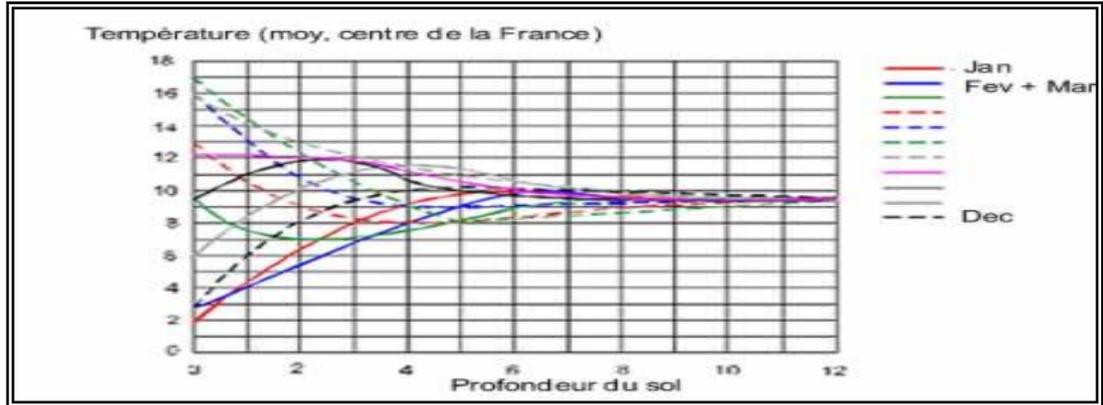
De plus dans la présente modélisation, un terme  $Geo(z)$  est ajouté à cette solution afin de représenter le réchauffement géothermique du sol. La solution retenue sera finalement :

$$T(z, t) = \bar{T}_s + Geo + A_1 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \sin\left(\omega t - \varphi_a - \frac{z}{\delta}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \sin\left(\omega t - \varphi_\Phi - \frac{z}{\delta}\right)$$

En pratique, l'effet géothermique peut être représenté par une fonction linéaire, indépendante du sol :

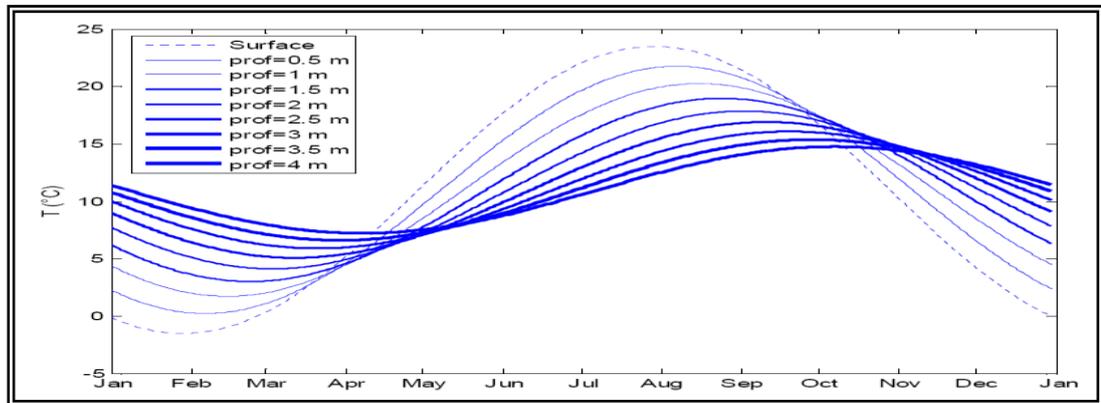
$Geo(z) = g \cdot z$  avec  $g$ , le gradient thermique en K/m. Ce coefficient pourra être pris égal à 0,2 K/m, Compte tenu des mesures réalisées par l'INSA de Toulouse (INSA, 2004). En raison de la faible

profondeur d'enfouissement d'un puits canadien, ce terme aura un effet assez réduit sur la température du sol (quelques dixièmes de degré tout au plus).



**Figure IV-42 :** Représentation de la variation annuelle de la température dans le Sol (Source : Lachal, 2008)

Ainsi, cette modélisation rend possible le calcul de la température du sol pour toute profondeur, à toute heure de l'année. Un aperçu de la forme du signal de température pour différentes profondeurs est présenté sur la Figure IV-51, ci-dessous.



**Figure IV-43 :** Représentation du comportement d'un signal de température sinusoïdal dans le sol (amortissement et déphasage) en fonction de la profondeur (Source : Amitrano, 2006)

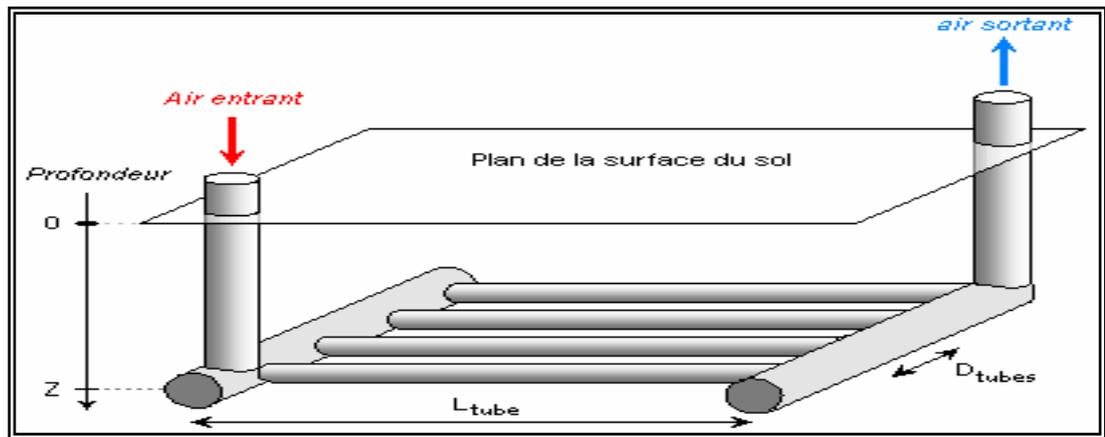
La température du sol, à toute profondeur et à tout instant, est donnée par l'équation, généralisée afin de prendre en compte chaque composante harmonique. Son calcul dépend donc de la température de l'air extérieur et du flux de rayonnement global incident mais aussi de l'humidité du sol, de la couverture du sol par la végétation, de la vitesse du vent, et de l'humidité relative moyenne de l'atmosphère. Ainsi, le modèle prend en compte la plupart des spécificités du lieu d'implantation de l'échangeur air-sol étudié.

#### IV-5-5-2-Le modèle thermique d'échangeur air-sol

Le modèle géométrique présenté ci-dessus peut être encore simplifié. En effet, pour chaque tube :

- Le débit d'air à l'intérieur est identique,
- Les dimensions et propriétés physiques sont identiques,
- Le sol environnant présente des propriétés thermiques homogènes et identiques.
- La température de l'air en entrée de chaque tube est la même.

Il est donc aisé de ramener le problème à celui d'un seul tube, par symétrie du modèle. En effet, le plus souvent le raccordement des tubes aux collecteurs se fera de manière identique, sans utilisation d'un raccord particulier. L'air traversant le puits verra donc le même environnement thermique, quel que soit le tube qu'il parcourt.



**Figure IV-44 :** Schéma de la géométrie du puits provençal  
(Source : Trombé, 2005)

En réalité, l'environnement de chaque tube n'est pas exactement identique puisque certains tubes se trouveront à proximité de deux autres tubes, tandis qu'aux extrémités, les tubes ne se trouveront à proximité que d'un seul tube (effet de bord). Ce point important sera pris en compte plus loin dans le modèle, lors de la réalisation du maillage.

L'intérêt de la simplification à un seul tube réside dans la simplification et la réduction du nombre des équations. Le temps de calcul en sera par conséquent fortement diminué.

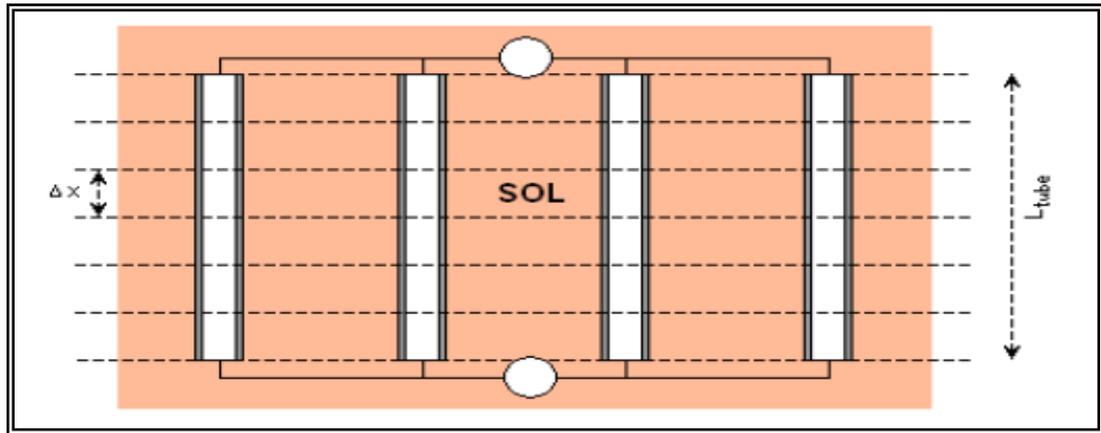
Le problème ayant été ramené à l'étude d'un seul tube, la température en sortie est la même pour chaque tube et il suffit de multiplier par le nombre total de tubes pour retrouver l'énergie totale transportée par l'air dans l'ensemble du puits.

Les échanges thermiques ayant lieu au sein des deux collecteurs d'entrée et de sortie sont ici négligés dans la mesure où ils sont généralement beaucoup plus faibles que ceux qui ont lieu au niveau des tubes de l'échangeur. Néanmoins, ils pourraient être pris en compte de manière simple puisqu'ils interviennent en série avec les tubes par rapport à l'écoulement de l'air.

#### - Le maillage

Sur la Figure IV-50, le modèle a été représenté pour un puits à quatre tubes en vue de dessus. Les collecteurs d'entrée et de sortie y sont symbolisés par des cercles.

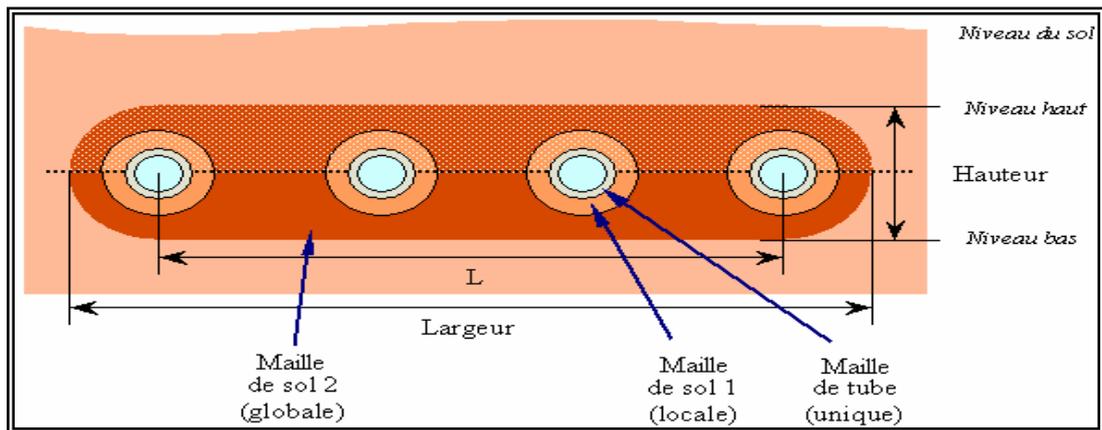
Le maillage spatial proposé consiste en un maillage régulier tout le long de chaque tube avec un pas  $\Delta x$  fixe.



**Figure IV-45 :** Schéma du modèle proposé (Vue de dessus)  
(Source : Thiers, 2008)

Le sol autour des tubes a été découpé en mailles concentriques. Ainsi en cheminant de l'intérieur vers l'extérieur du tube, les mailles se répartissent comme suit :

- l'intérieur du tube où circule l'air (maille air),
- le tube (maille tube),
- une première maille de sol circulaire (maille sol1),
- une seconde maille de sol oblongue (maille sol2),



**Figure IV-46 :** Le modèle proposé (Vue en coupe verticale)  
(Source :Thiers, 2008)

Dans le cadre de la modélisation en volumes finis, chacune de ces mailles est supposée à température uniforme. Les échanges entre mailles sont calculés à l'aide de ces températures, appliquées sur une surface isotherme intérieure à la maille dont la position et la valeur sont définis plus bas. Les trois mailles les plus intérieures (air, tube et sol1) sont délimitées par des cylindres à section circulaire :

- **la maille intérieure (air)** : représente l'espace intérieur du tube et est constituée par l'air circulant dans le tube.
- **la maille tube** : représente exactement le tube. Cette maille est nécessaire à la prise en compte fine des caractéristiques du tube (en particulier la composition, le diamètre et l'épaisseur). Elle permet de connaître la température du tube.
- **la première maille de sol (sol1)** : est une couronne circulaire de sol. L'épaisseur de sol qu'elle représente est proche de la profondeur de pénétration d'un signal thermique de période un jour. Cette maille a pour rôle la prise en compte de la variation de température du sol à proximité immédiate du tube, et donc le stockage thermique local par le sol.
- **la seconde maille de sol (sol2)** : n'est pas circulaire, puisqu'elle présente une forme parallélépipédique dont deux côtés opposés sont des demi-cylindres. Cette maille concerne l'ensemble de la nappe de tubes, qu'elle englobe, ce qui explique son étirement dans la direction de la largeur du puits canadien. Elle a été conçue dans l'objectif de prendre en compte l'interaction des tubes les uns sur les autres, et également les effets de bords liés à la géométrie de la nappe de tubes. C'est cette maille qui est en contact avec la « sollicitation thermique » imposée par le sol. Ainsi, au delà de cette maille, la température du sol n'est plus influencée par le puits canadien mais imposée par le modèle du massif semi-infini soumis à une excitation périodique présenté plus haut.
- **le sol** : représente l'ensemble du sol. Il ne forme pas une maille en soit puisque sa température varie en fonction de la profondeur, conformément au modèle de massif semi-infini. Cette température est imposée en surface de la maille sol2. Cependant, la géométrie de cette dernière maille amène à utiliser deux températures de sol : une température sur la face supérieure de la maille sol2 ( $T_{\text{sol}} \text{ haute}$ ) et une température sur la face inférieure ( $T_{\text{sol}} \text{ basse}$ ). Le maillage est donc subdivisé en deux moitiés – inférieure et supérieure – selon le plan horizontal contenant l'axe des tubes. Cette subdivision en demi-maille est appliquée aux deux mailles de sol (sol1 et sol2) mais pas aux mailles tube et air. En effet, la dissymétrie des températures entre partie haute et basse sera considérée comme négligeable sur le tube et a fortiori sur l'air à l'intérieur du tube.

Il faut noter que l'échange thermique au niveau des extrémités de la maille sol2 – qui constitue la particularité de cette maille – est aussi calculé à partir des deux températures de sol  $T_{solhaute}$  et  $T_{solbasse}$  définies plus haut. Ceci constitue une approximation supplémentaire qui ne devrait pas induire trop d'erreurs – d'autant moins que le nombre de tubes du puits canadien sera élevé.

**- Définition des paramètres géométriques du modèle de puits et du maillage**

Les paramètres définissant le puits modélisé sont :

$Z$  : la profondeur d'enfouissement de la nappe de tubes par rapport à la surface du sol. Cette profondeur est mesurée à partir de l'axe des tubes. Elle est comptée positivement.

$L_{tube}$  : La longueur des tubes.

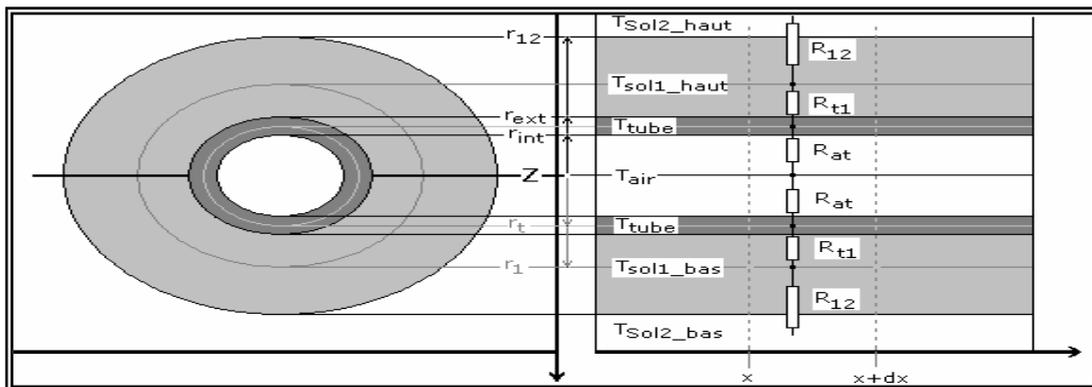
$D_{tubes}$  : La distance entre les axes des tubes.

$r_{int}$ ,  $r_{ext}$  : Les rayons intérieur et extérieur des tubes.

$e_{tube}$  : L'épaisseur de la paroi des tubes.

$N_{tubes}$  : Le nombre de tubes formant la nappe du puits.

Les paramètres du maillage sont plus nombreux. Ils permettent de définir les surfaces et volumes d'échange.

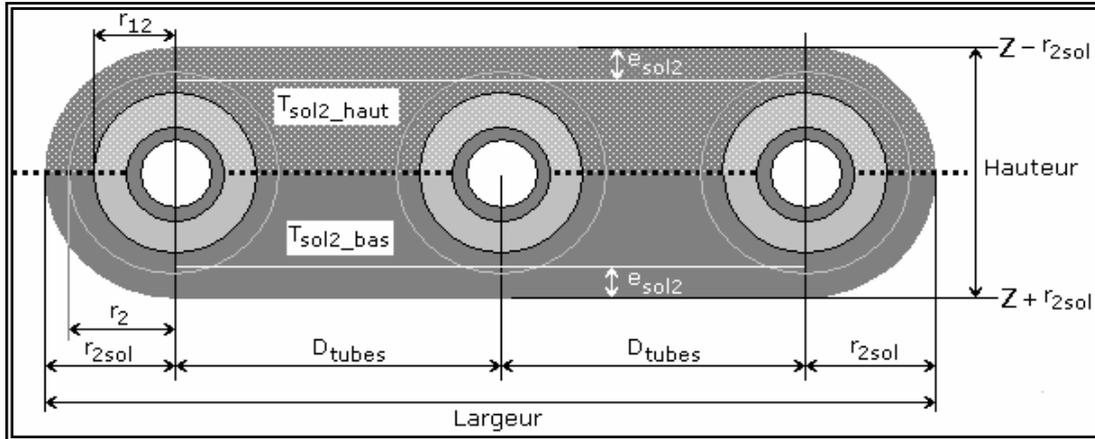


**Figure IV-47** : Schéma des mailles sol1, tube et air avec résistances thermiques équivalentes (Coupe de face et de profil)  
(Source : Thiers, 2008)

- $L_{tube}$  : La longueur des tubes.
- $D_{tubes}$  : La distance entre les axes des tubes.
- $r_{int}$ ,  $r_{ext}$  : Les rayons intérieur et extérieur des tubes.
- $e_{tube}$  : L'épaisseur de la paroi des tubes.
- $N_{tubes}$  : Le nombre de tubes formant la nappe du puits.

Les paramètres du maillage sont plus nombreux. Ils permettent de définir les surfaces et volumes d'échange.

- $r_t$  : Rayon interne de la zone tube.
- $r_{ext}$  : Rayon extérieur du tube et de la maille tube. Rayon intérieur de la maille Sol1.
- $r_1$  : Rayon interne de la maille Sol1.
- $r_{12}$  : Rayon extérieur de la maille Sol1. Rayon intérieur de la maille Sol2.



**Figure IV-48:** Détail de la maille de sol globale pour un puits à trois tubes (sol2)

(Source : Thiers, 2008)

- $r_{int}$  : Rayon intérieur du tube et de la maille tube. Rayon extérieur de la maille air.
- $r_{12}$  : Rayon intérieur des faces internes de la maille Sol2. Rayon extérieur de la maille Sol1.
- $r_2$  : Rayon interne des deux extrémités cylindriques de la maille.
- $r_{2sol}$  : Rayon extérieur des deux extrémités cylindriques de la maille.
- $e_{sol2}$  : Épaisseur de la partie centrale de la maille Sol2 en contact avec le reste du sol.

La structure de la maille Sol2 est un peu plus complexe que celle de la maille Sol1. En effet, cette maille se compose de deux parties distinctes : d'une part, ses deux extrémités, et d'autre part, sa partie centrale. Les extrémités sont formées de deux demi-cylindres de mêmes dimensions. Pareillement à la maille Sol1, ces extrémités présentent un rayon intérieur, interne et extérieur. Le rayon intérieur coïncide avec le rayon extérieur de la maille Sol1, avec laquelle la maille est en contact.

La partie centrale, de largeur égale à  $(N_{tubes}-1) * \text{la distance inter-axe des tubes}$ , est un volume parallélépipédique rectangulaire donc ont été ôtés les volumes des mailles qu'il inclut. Sa surface interne est donc connue. Sa surface externe, plane, se trouve en continuité de celle des deux extrémités.

Les échanges thermiques sont considérés à symétrie circulaire avec chacune des mailles Sol1 (le rayon de l'échange est  $r_{2sol}$ ). Par contre, l'échange avec le reste du sol est considéré comme plan sauf aux extrémités. L'épaisseur de la couche échangeant avec le sol dans la partie

centrale est notée  $e_{sol2}$ . Elle est calculée de manière que le volume total des échanges – avec le sol et avec la maille Sol<sub>1</sub> – soit égal au volume réel de la partie centrale de la maille.

L'échange avec le sol au niveau des extrémités correspond à celui d'une couronne circulaire. La température du sol est calculée pour les hauteurs  $Z \pm r_{2sol}$ . De manière à gérer le calcul ramené à un seul tube, la résistance thermique totale est calculée puis divisée par le nombre de tubes total  $N_{tubes}$ .

Enfin, il faut rappeler que la maille Sol2 est divisée en deux parties symétriques (haute et basse) exactement de la même manière que la maille Sol1.

### - Dimensionnement tube et température de sortie

Nous ferons ici l'hypothèse que la température extérieure du tube est constante, ce qui revient à considérer que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangée. Nous considérerons de plus que l'échange thermique se fait en régime stationnaire, c'est à dire que les températures restent constantes dans le sol et à la paroi du tube.

L'échange de chaleur à l'intérieur d'un tube où circule un fluide se fait par convection forcée. Le flux thermique par unité de surface,  $\phi$ , à travers la paroi du tube est proportionnel à la différence de température entre la surface interne,  $T_{sol}$ , et externe du tube,  $T_{air}$ , et à l'inverse de la résistance thermique de la paroi,  $R$ .

$$\phi = \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R}$$

La résistance de la paroi est composée, d'une part, de la résistance à la conduction, d'autre part de la résistance à la convection.

$$R = R_{cond} + R_{conv}$$

En considérant une paroi de faible épaisseur devant le rayon du tube, on peut faire l'approximation d'une paroi plane. La résistance à la conduction est alors le rapport de l'épaisseur,  $e$ , et de la conductivité,  $\lambda$ , de la paroi.

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda}$$

Donc :

$$R_{cond} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

-  $e$  : épaisseur en m

-  $\lambda$  : conductivité en W/(m.K)

Pour une gaine en matériau plastique (ex PVC ou PE) d'épaisseur  $e$  et de conductivité  $\lambda$ ,

La résistance thermique en convection forcée est fonction de la vitesse de circulation de l'air.

$$R_{conv} = \frac{1}{5.55 \cdot V^{0.8}}$$

La quantité de chaleur échangée par unité de temps correspond au flux thermique multiplié par la surface.

$$dQ = \varphi \cdot S \cdot dt = \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R} S \cdot dt$$

$$\Delta TML = \frac{\Delta T_{ext} - \Delta T_{sortie}}{\ln \frac{\Delta T_{ext}}{\Delta T_{sortie}}}$$

Cet échange de chaleur entraîne la variation de température de l'air.

$$dT_{air} = \frac{dQ}{C \cdot \rho \cdot V}$$

- C : Chaleur massique (pour l'air C= 1 kJ/(kg.K))

- ρ : masse volumique (pour l'air ρ=1.2 kg/m<sup>3</sup>)

- V : volume d'air considéré.

Le flux transmis au sol par l'air, par convection puis par conduction à travers la paroi du tuyau

$$\text{en est donné par : } \Phi = \varphi \cdot S \quad (1)$$

$$\text{Avec : } S = 3.14 \cdot d_i \cdot L$$

$$\text{D'où } \Phi = \varphi \cdot \pi \cdot d \cdot L$$

$$\text{Or } \varphi_{\text{par mètre linéaire}} = \varphi \cdot \pi \cdot d$$

$$\text{D'où } \Phi = \varphi_{\text{par mètre linéaire}} \cdot L \quad (2)$$

De plus, on peut exprimer ce flux entre l'entrée et la sortie du tuyau :

$$\Phi = \text{débit volumique} \cdot C_p (T_{air} - T_{sortie}) = \rho \cdot q_v \cdot C_p (T_{air} \text{ entré} - T_{sortie})$$

$$T_{sortie} = T_{air} \text{ souhaité qui est fixée}$$

Où

$$\rho = \text{densité volumique (kg/m}^3\text{)} \quad (1.2) ;$$

$$q_v = \text{débit} = 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_p = 1004 \text{ (J/Kg.K)} \text{ capacité massique de l'air sec}$$

$$\text{Relation(1) = Relation(2)}$$

On obtient :

$$L = \frac{\rho \cdot q_v \cdot C_p \cdot (T_{air} - T_{souhaité})}{\varphi \text{ par m linéaire}}$$

Ou encore

$$L = \frac{R_{tot} \cdot \rho \cdot q_v \cdot C_p (T_{air} - T_{souhaité})}{(T_{air} \text{ moyen} - T_{sol})}$$

### - Calcul de perte de charge

Pour pouvoir dimensionner notre puits canadien, il faut tenir compte du fait que le déplacement de l'air dans le tuyau implique l'existence d'une énergie motrice qui est à l'origine du mouvement. Cette énergie résulte d'une pression en amont du tuyau. Mais lorsque l'air se déplace il y a des pertes de charges qui interviennent et qui sont dues à la forme, aux longueurs et la rugosité de la canalisation, aussi à la vitesse d'écoulement et à la viscosité du fluide. Ce sont les pertes de charges.

On distingue deux types de pertes de charges :

- Celles qui sont dues aux frottements de l'air sur la paroi interne de la tuyauterie, appelé pertes de charges régulières ou systématiques.
- Celles qui sont dues à la résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coude élargissements ou rétrécissement de la section,.....;), ce sont les pertes de charge singulières ou accidentelles,

Pour calculer les pertes de charge, on regarde tout d'abord le régime d'écoulement avec le nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot di}{\eta}$$

Avec :

Re = nombre de Reynolds sans dimension

$\rho$  = masse volumique de l'air 1,2kg/m<sup>3</sup>

v = vitesse de l'air dans le tuyau (m/s)

di = diamètre interne du tuyau

$\eta$  = viscosité dynamique de l'air

Si  $Re < 2000$  le régime d'écoulement est dit laminaire

Si  $2000 < Re < 3000$  le régime d'écoulement est dit transitoire

Si  $Re > 3000$  le régime d'écoulement est dit turbulent

#### - Pour les pertes de charges accidentelles ou singulières:

$$\Delta\rho = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot v}{2}$$

Avec :

$\lambda$  = coefficient de pertes de charges (déterminé via l'abaque sans dimension)

$\rho$  = masse volumique de l'air 1,2kg/m<sup>3</sup>

v = vitesse de l'air dans le tuyau (m/s)

#### - Pour les pertes de charges systématiques ou régulières:

$$\Delta\rho = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L}{2 \cdot Di}$$

Avec :

$\lambda$  = coefficient de pertes de charges (déterminé par l'abaque sans dimension)

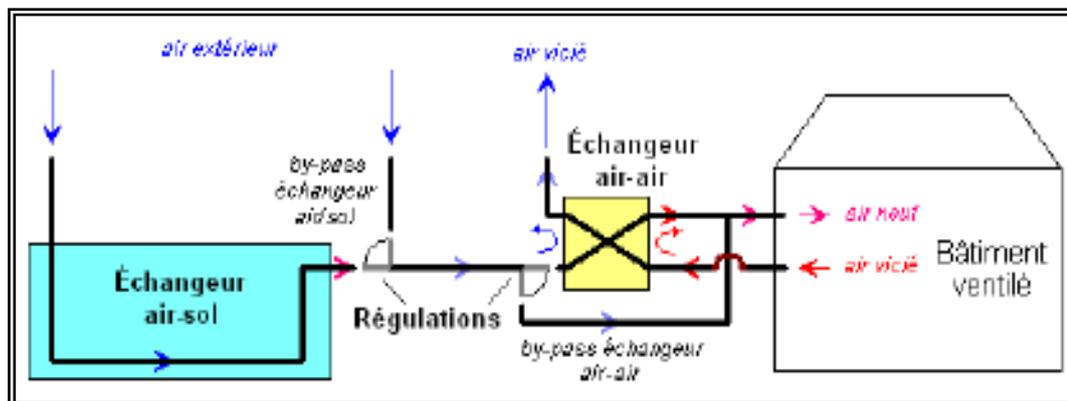
$\rho$ =masse volumique de l'aire 1,2kg/m<sup>3</sup>

$v$ = vitesse de l'aire dans le tuyau (m/s)

$Di$ = diamètre intérieure (m)

$L$ = longueur du tuyau prit en compte

Ainsi avec ces formules nous pouvons calculer les pertes de charges à chaque endroit de notre tuyau, avoir le total des pertes de charges, on additionne les pertes de charges calculées à part. Quoi qu'il en soit, des calculs préliminaires indiquent qu'en respectant un rapport débit / surface d'échange propice à l'amortissement de l'oscillation journalière (ou annuelle) et en répartissant ce débit sur un nombre suffisant de tubes, de telle sorte à ne pas dépasser les 6 m/s (3 m/s en version annuelle), on devrait pouvoir maintenir une surconsommation électrique inférieures à 5% des gains thermiques réalisés.



**Figure IV-49:** Schéma de principe du système de ventilation intégré  
(Source : Thiers, 2008)

### IV-5-5-3-Distributeur et collecteur

L'entrée de l'air dans le puits canadien s'effectue par un puits d'entrée collecteur qui distribue l'air dans les différents tubes enterrés, tandis qu'un autre collecteur reçoit l'air en provenance de chaque tube pour le guider jusqu'à la pièce à ventiler. Ces deux éléments du puits canadien ne sont pas conçus pour réaliser l'échange de chaleur avec le sol, comme c'est le cas pour les tubes. Ceci ne veut pas dire qu'ils n'y participent pas. C'est pourquoi, il serait envisageable d'évaluer la chaleur échangée lors de la descente de l'air dans le sol et lors de sa remontée [Trombe, 2004].

Cet effet n'a pas été finalement pris en compte en raison de son impact très marginal sur le phénomène (l'air parcourt 2 m dans le large conduit du collecteur d'entrée et plusieurs dizaines de mètres dans des conduites plus fines, donc avec un échange thermique meilleur et beaucoup plus long). De plus, la partie collectrice de sortie n'est généralement pas enterrée, puisqu'elle se trouve souvent à l'intérieur même du bâtiment, dans une partie enterrée du bâtiment (cave, sous-sol, vide sanitaire). C'est le cas, notamment, du puits qui a été utilisé pour la validation expérimentale du modèle [Trombe, 2004].

Enfin, le collecteur se trouve entouré par un sol dont la température est comprise entre la température de l'air extérieur et de celle du sol à la profondeur d'enfouissement des tubes de l'échangeur. Ainsi, l'échange thermique dans la partie collectrice en entrée de puits ne devrait que très légèrement améliorer l'efficacité du puits, tandis que l'échange dans la partie collectrice en sortie aura tendance à réduire cette efficacité. Par conséquent, il vaudra mieux, dans la mesure du possible, isoler l'ensemble des tubes situés en aval du puits, et ceci jusqu'à l'entrée dans la pièce à ventiler. Cette dernière considération est d'autant plus pertinente que la partie non enterrée en aval du puits est longue [Trombe, 2004].

#### **IV-5-5-4-Ventilateur**

Le ventilateur est un élément essentiel du puits canadien. C'est lui qui assure le débit d'air dans les tubes. Il pourra s'agir, selon les cas, d'un ventilateur spécialement dédié au puits canadien, ou bien d'un ventilateur servant plus généralement au renouvellement de l'air du bâtiment. Dans les deux cas, ce ventilateur convertit une puissance électrique en puissance mécanique avec un rendement qui varie selon le type de ventilateur. Le reste de la puissance électrique est dégradé sous la forme d'une puissance thermique directement évacuée par l'air circulant dans le puits [Trombe, 2004]. L'élévation de température engendrée a donc un impact sur la température en sortie de puits. La puissance thermique dissipée par le ventilateur dans l'air circulant dans le puits canadien est fonction de la puissance électrique du ventilateur et de son rendement mécanique. Or ce rendement dépend du point de fonctionnement du ventilateur ; celui-ci dépend de la différence de pression nécessaire pour assurer le débit requis ; cette différence de pression dépend elle-même des pertes de charges engendrées par le flux d'air dans le puits [Trombe, 2004].

Les pertes de charges et la caractéristique du ventilateur ne sont généralement par connues, par contre, il est possible d'évaluer de manière approchée la puissance thermique dissipée à partir des plages de variation du rendement du ventilateur. Pour une installation domestique, cette puissance peut varier entre quelques dizaines et quelques centaines de watts,

ce qui va correspondre à une élévation de température de l'air de l'ordre de quelques dixièmes de degrés. Il est aussi possible de détailler cette approximation en évaluant plus précisément les pertes de charges engendrées par le flux d'air dans les canalisations du puits canadien. Mais ce calcul n'est pas d'un grand intérêt dans la mesure où il ne prend pas en compte les principales pertes que sont les pertes de charge singulières (liées à la géométrie, aux filtres, etc.), les pertes mécaniques et les pertes électriques [Trombe, 2004].

#### IV-6-5-5-Coûts

Le géocooling, dans la mesure où il peut, en combinaison avec la production d'énergie de chauffage, garantir une recharge thermique du terrain, est une solution intéressante qui permet d'offrir une prestation de froid sans un investissement supplémentaire significatif et avec un coût de fonctionnement très bas.

En règle générale, le coût d'un système avec géocooling doit être comparé à un système conventionnel qu'offre des prestations égales. Aussi bien l'investissement que les coûts de gestion (fonctionnement et maintenance) doivent être pris en compte. Un système de géocooling, conçu uniquement pour satisfaire une demande de refroidissement est caractérisée par un investissement élevé et un coût de gestion très bas. Pour être concurrentiel avec un système conventionnel, une « durée de vie » minimum du système est nécessaire. Celle-ci varie, en fonction de la géologie locale, des conditions climatiques locales et du prix de l'énergie électrique pratiqué localement.

#### IV-5-6-Les précautions d'usage

Afin d'assurer une bonne qualité de l'air insufflé, un certain nombre de précautions doivent être prises pour éviter tout dysfonctionnement et/ou pollution (odeurs, humidité, bactéries,...) qui pourraient résulter des différents composants du système.

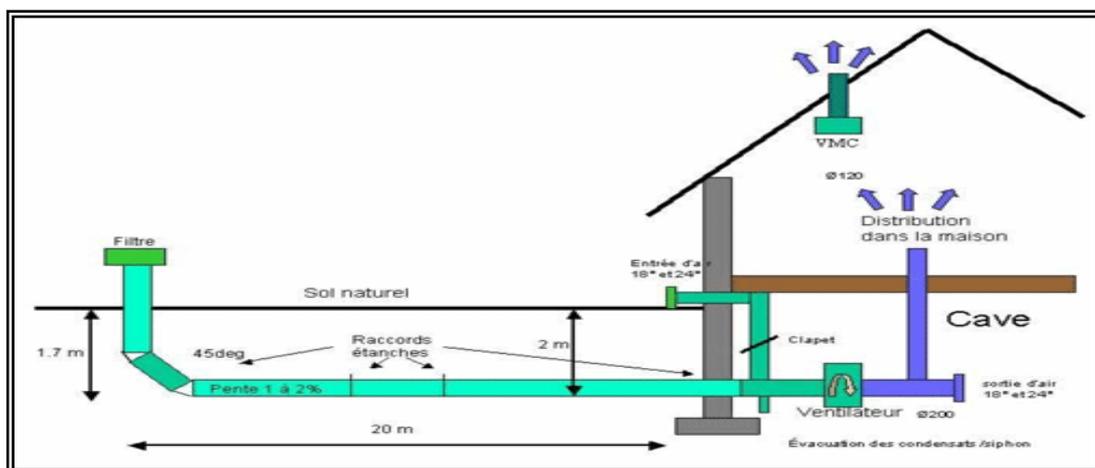


Figure IV-50 : Détail de puits canadien  
(Source : éconologie.com)

#### **IV-5-6-1-La gestion des condensats et des infiltrations d'eau**

La condensation est un problème d'été car l'air chaud stocke plus d'humidité que le même volume d'air froid et vice versa. En été, des écoulements d'eau issus de la condensation peuvent se former. Pour limiter ce phénomène, le parcours des conduits doit avoir une pente de 1 à 3% orientée dans le sens d'écoulement de l'air. Au point bas du parcours avant la fin du conduit, un siphon doit permettre l'évacuation des condensats. Si le puits est situé à proximité d'une nappe souterraine peu profonde, un soin particulier doit être apporté à l'étanchéité du dispositif pour éviter l'infiltration d'eau dans les conduits [Herzog, 2004].

Il convient donc lors du terrassement de faire attention à la pente et de prévoir impérativement des conduits lisses. Avant la première mise en service, un nettoyage des conduits peut permettre de contrôler l'écoulement de l'eau. Il convient de les évacuer. Pour cela il existe trois possibilités [Herzog, 2004]:

- Ce système permet une étanchéité parfaite depuis l'entrée de l'air jusqu'au système de ventilation. Cette solution est à privilégier dans les régions à fortes concentrations en gaz radon dans le sol ou si votre sol est très humide (sources, nappes souterraines...)

Détail du siphon:

- Le passage de l'air assèche légèrement le siphon. Un système simple consiste à placer un tuyau dans un récipient rempli d'eau (prévoir une contenance en fonction du débit). L'excédent peut être évacué dans un écoulement d'eaux usées. Veiller à placer un deuxième siphon dans ce cas pour éviter d'aspirer des mauvaises odeurs.
- Dans le cas d'une maison dépourvue de cave, les condensats peuvent être récoltés dans un regard placé au niveau du point bas. Ce regard permettra également d'inspecter visuellement le tuyau.
- Une autre solution pour une maison sans cave est de placer un puits perdu débouchant sur un lit de cailloux pour permettre l'infiltration des condensats dans le sol. »

#### **IV-5-6-2-La qualité de l'air**

L'entrée d'air doit être implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles, ...) et à une hauteur suffisante pour éviter l'aspiration de la poussière. Elle doit être accessible pour le nettoyage. Si des filtres à particules (2-5 micromètres) sont installés, un entretien régulier de ces derniers doit être effectué environ tous les 4 mois. Eviter également de placer l'entrée d'air au milieu d'une végétation dont les pollens sont allergisants. L'idéal est de respirer un air d'une qualité au moins équivalente à l'air extérieur, meilleure si possible. Lorsque le puits canadien est couplé avec une VMC double flux, il est important de bien entretenir les filtres car

la qualité de l'air en dépend. Certaines grandes installations (plus de 2 000 m<sup>3</sup>/h) n'ont d'ailleurs plus de filtration par crainte des pollutions de l'air dues à des filtres encrassés. Voici quelques recommandations qui permettront d'obtenir un air le plus sain possible [Herzog, 2007]:

- Utilisez un matériau faiblement émissif (vapeur, odeur...) pour l'entrée du puits canadien (alu, tôle...).
- Protégez au minimum l'entrée à l'aide d'une grille fine pour éviter que des animaux (rongeurs, moustiques...) y pénètrent.
- Si vous optez pour un filtre (2 à 5 micromètres), pensez à le nettoyer tous les quatre mois. Préférez une filtration de plus en plus fine, de l'extérieur vers l'intérieur.
- Placez l'entrée à une hauteur suffisante (1,20 m minimum) pour éviter d'aspirer de la poussière, et loin des sources de pollution (route, compost...).
- Avant la première mise en route, nettoyez le tuyau, vous pourrez ainsi contrôler l'écoulement de l'eau.

#### **IV-6-6-3-Les risques liés au radon**

Dans les zones où le risque d'émission de radon<sup>2</sup> ou de polluants par le sol est important, il est nécessaire d'utiliser un échangeur thermique sur le puits canadien pour ne pas utiliser l'air transitant par le puits comme air neuf. Cet échangeur peut permettre d'évacuer tout problème bactériologique qui serait dû à la condensation. [Herzog, 2007]

#### **IV-5-6-4-Les matériaux**

Les conduits doivent avoir une stabilité et une résistance à la pression suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre. Par ailleurs, l'étanchéité des conduits doit permettre d'éviter l'infiltration des eaux souterraines et la propagation de bactéries. Il faut également veiller aux raccordements des différents conduits et privilégier des raccords par joints à lèvres, éviter de coller les raccords pour limiter le risque de rupture lors du remblai et surtout le risque de dégagement de vapeurs nocives dû aux colles. Le matériau utilisé ne doit pas dégager de vapeurs nocives. L'entretien du ventilateur est identique à tous les systèmes courants de ventilation. [Herzog, 2004]. Le matériau utilisé ne doit pas dégager de vapeurs nocives comme cela peut être le cas pour le PVC par exemple lorsqu'il est soumis à des températures élevées (supérieures à 30 °C).

#### **IV-5-6-5-Régulation**

Pour réaliser l'évaluation précise des économies d'énergies pouvant être engendrées par l'adjonction d'un puits canadien à un bâtiment, il est nécessaire d'optimiser non seulement, le

---

<sup>2</sup> Le radon est un gaz incolore, inodore et insipide, provenant du sous-sol, après désintégration de l'Uranium présent dans le sol, au travers des porosités du sol et sous sol, aspiré dans le bâtiment par l'effet cheminé, il se concentre dans les espaces mal ventilés, selon l'OMS ce gaz provoque un risque majeur sur la santé (cancérogène) [Liebard et De Herde, 2005].

dimensionnement du puits, mais aussi le régime de fonctionnement pour éviter que le puits accroisse les besoins de chauffage ou de rafraîchissement en raison d'une mauvaise régulation. Par exemple, en période chaude, lorsque la température de l'air extérieur est plus basse que celle en sortie de puits, la ventilation doit de faire avec l'air extérieur – par exemple par ventilation nocturne – plutôt qu'avec l'air conditionné par le puits. Un arbitrage permanent est nécessaire entre l'air du puits canadien et l'air extérieur. [Herzog, 2004].

#### **IV-6- Conclusion**

Il existe quatre leviers pour améliorer le confort d'été dans le bâtiment : la protection solaire, la maîtrise des apports internes, l'inertie et la ventilation. Le puits canadien ou provençal est une solution thermique dite passive- qui met en valeur le potentiel géothermique existant en surface de chaque point de notre terre-que l'on installe en amont du système de ventilation et qui se sert de l'inertie thermique du sol pour préchauffer ou refroidir l'air intérieur du bâtiment. Cette technique doit être vue et pensée comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci avec une intégration soignée du concept énergétique qui doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes (éclairage, appareils,..), ainsi qu'une estimation de la consommation électrique des auxiliaires.

Ce modèle d'échangeur air-sol et de gestion de la ventilation basse énergie est conçu en faisant intervenir de nombreux paramètres (conditions climatiques, propriétés physiques du sol et des tubes de l'échangeur air-sol, configuration géométrique de l'échangeur, rendement de l'échangeur et du ventilateur) permettent la prise en compte de phénomènes qui vont déterminer ses performances. Ainsi, ce système doit être vus et pensés comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci.

Le concept énergétique doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes (éclairage, appareils,..), ainsi qu'une estimation soignée de la consommation électrique des auxiliaires. Les phénomènes physiques sont modélisés en suivant des modèles théoriques réalistes et, pour beaucoup, éprouvés. Les hypothèses simplificatrices formulées ont permis d'aboutir à un modèle relativement simple dont la résolution des équations nécessite l'usage d'outils mathématiques bien maîtrisés (calcul matriciel, méthode numériques des différences finies). Les limites du modèle (structure du maillage, géométrie de l'échangeur air-sol, phénomènes secondaires négligés) seront évaluées à

l'étape de validation. Outre les modèles mathématiques de dimensionnement, il existe des logiciels (outil de simulation), qu'on peut citer à titre d'exemple :

- Le logiciel de simulation TRNSYS ;
- Le logiciel de simulation GAEA ;
- Le logiciel de simulation Pléiade + comfie.

Cette analyse nous a permis de déduire sur différents plans, que le puits canadien ou provençal:

Economiques : Faible consommation électrique avec une alimentation photovoltaïque est tout à fait envisageable.

- Ecologiques : elle n'utilise pas de fluides frigorigènes, ni de compresseur et consomme peu d'électricité.

- La maintenance restreinte.

- Indicateurs de coût (par rapport à un système de climatisation classique) :

- L'investissement est en fait reporté sur l'enfouissement des puits dans le sol.
- Coûts énergétiques : très faibles.
- Coûts de maintenance: très faibles.

## **V-1-Introduction**

Dans la présente étude, nous tenons compte d'une méthodologie interdisciplinaire permettant d'étudier empiriquement notre domaine d'investigation qui est le thème sur l'intégration de la composante énergétique dans le bâtiment -voire : la combinaison : énergie renouvelable- bâtiment -pour améliorer les caractéristiques thermiques d'une ambiance en été, d'une part et de contribuer à l'économie d'énergie d'autre part.

Dans un premier temps, nous procédons à une méthodologie analytique des caractéristiques du site et du bâtiment pour déterminer les conditions préalables qui nous permet d'intégrer efficacement l'énergie géothermique de surface dans le bâtiment via l'échangeur air/sol ou puits provençal. Cette combinaison est considérée comme solution alternative à la climatisation, qui doit être pensée comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci avec une intégration soignée du concept énergétique qui doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes (éclairage, appareils,...), ainsi qu'une estimation de la consommation électrique des auxiliaires. Sur la base de données recueillies (données physique mesurables sur terrain : climatologiques, environnementales, les caractéristiques du sol, les caractéristique du bâtiment à étudier), les résultats de la campagne de mesures seront interprétés via un outil d'aide à la conception afin de dimensionner le puits provençal.

A présent, il existe une bibliothèque de modèles pour l'étude de modélisation et de dimensionnement d'une telle combinaison. Outre le modèle dynamique à éléments finis développé par Hollmuller pour le logiciel TRNSYS, plusieurs modèles d'échangeurs air-sol ont déjà été proposés, notamment par Benkert et al, Bojić et al, De Paepe et Janssens , Dibowski, Zweifel ,Al Ajmi et al, Ghosal et Tiwari ou encore Badescu . L'analyse de ces différents modèles a permis d'identifier les principaux phénomènes physiques mis en œuvre par l'échangeur air-sol, tels que la profondeur d'enfouissement et le nombre des tubes, le débit de l'air dans les tubes, la nature et le taux d'humidité du sol, l'échange thermique en surface du sol.

L'objectif principal de ce chapitre porte sur l'application de model développé dans le chapitre précédent pour le dimensionnement d'un puits provençal à l'aide d'un outil de simulation, implémenté dans un environnement modulaire ( Scilab), adapté au bâtiment choisi pour cette étude (maison individuelle dan la ville de Tizi-Ouzou).

## **V-2- Les paramètre de modélisation du puits provençal**

Afin de dimensionner correctement l'échangeur air-sol, dans le but de réduire le recours à la climatisation conventionnelle, ce dernier doit être intégré dans un ensemble de paramètres. Ces paramètres sont déterminés sur la base des données fournis par les services de l'office

national de la météo, les caractéristiques de la construction étudiée, les caractéristiques du sol (selon l'étude géotechnique du PU07), une campagne de mesure de température intérieure et extérieure journalière (sèche et humide) qui s'est déroulé le 01 et le 02 juillet 2009. Il s'agit donc d'une simulation pour la modélisation d'un modèle de puits provençal. Le but est d'assurer une ventilation basse énergie, pour le cas de la ville de Tizi Ouzou.

Plusieurs paramètres interviennent dans le dimensionnement d'un puits provençal :

- Longueur du puits
- Diamètre de la conduite
- Débit de l'air
- Profondeur du puits
- Type du sol
- Température du bâtiment

Dont l'efficacité de l'échangeur air-sol dépend de trois températures caractérisant son fonctionnement :

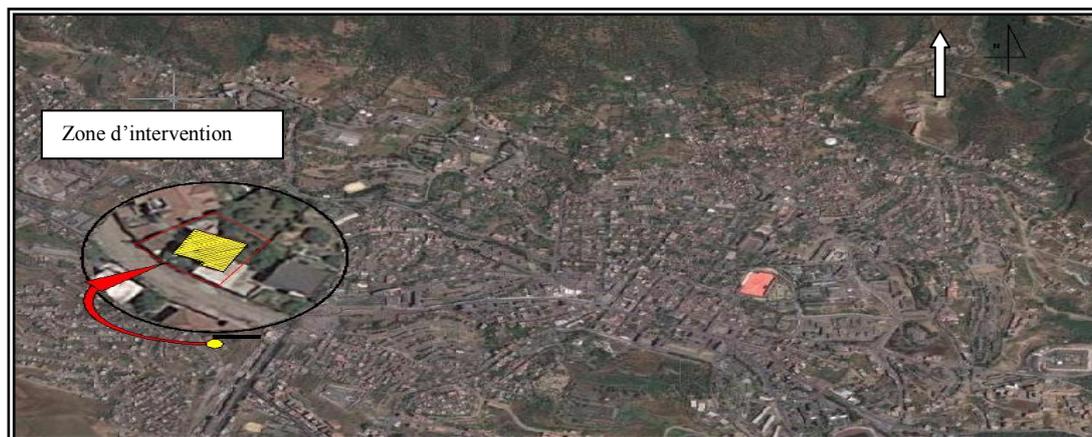
- la température de l'air en entrée de l'échangeur air-sol
- la température du sol au niveau de l'échangeur air-sol
- la température de l'air en sortie de l'échangeur air-sol

## **V-2-1- Les paramètres du site**

### **V-2-1-1-Situation de la ville de Tizi Ouzou**

La ville de Tizi-Ouzou est située au nord de l'Algérie, sur un col d'une hauteur de 270 m (col : Tizi en kabyle), n'est pas tout à fait une ville de montagne et encore moins de plaine. Elle est enserrée par le massif du Belloua (de 650 m d'altitude) et le massif de Hasnaoua (de plus de 600 m d'altitude). La ville de Tizi-Ouzou, dont le nom signifie donc « Col des genêts », est à 100 Km à l'est d'Alger. Elle est la capitale de la grande Kabylie.

Notre zone d'étude se situe au sud ouest de la ville de Tizi Ouzou, à une latitude de 36°4' Nord et une longitude de 04°03' Est. Elle s'élève à une altitude de 180 m. Elle s'inscrit dans un tissu contemporain, à moyenne densité, caractérisée par l'implantation de constructions récentes de type pavillonnaire dans des lotissements résidentiels dont le gabarit varie entre R+1 et R+2 (C.E.S : entre 0.5 et 0.9, le C.O.S : entre 1 et 2.7).



**Figure V-1** : Délimitation de la zone d'étude  
(Source : l'auteur)

### **V-2-1-2- Caractéristiques climatique du site**

La ville de Tizi Ouzou se situe dans la zone de climat méditerranéen tempéré et doux. Toutefois, en raison des massifs de montagne qui l'entoure la chaleur peut être suffocante car l'air marin se heurte au relief montagneux qui l'empêche d'atteindre la ville et avec la présence de barrage d'Oued Aissi (Taksebt), le brume provoqué par l'évaporation à contribuer à l'évolution de taux d'humidité créant des situations intolérables en été.

D'après la classification donnée par recommandations architecturales [MHU, 1993], la ville de Tizi Ouzou est localisée dans la zone H1a d'Hiver et E1 d'Ete, dont :

- H1a subit l'influence de la mer (littoral – mer, altitude < 500m), caractérisée par un hiver doux avec des amplitudes faibles.
- La zone E1, elle subit l'influence de la mer dont l'été chaud et humide l'écart des températures diurnes et nocturnes est faible.

#### **V-2-1-2-1-La température de l'air**

Les données climatiques de la ville de Tizi Ouzou (fournies par l'ONM) montrent qu'on peut distinguer d'après les données descriptives des températures moyennes mensuelles (sur une période de dix ans : de 1997 à 2006) que la courbe des ces derniers évolue d'une manière régulière et que la température moyenne annuelle est de 24,9°C. La température moyenne la plus basse est de 6,7°C en janvier, le mois le plus froid, alors que la température moyenne la plus importante est de 36.1 °C en Aout, qui est considéré comme le mois le plus chaud.

Les écarts ne sont pas trop contrastés entre eux mais importants avec une amplitude moyenne annuelle de 11,4 °C. On distingue deux périodes qui forment l'année :

Une période chaude qui s'étend du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre ou les températures moyennes varient entre 26 °C et 27 °C et les températures les plus élevées sont enregistrées en

juillet avec 35.4 °C et en août avec 36,1 °C et une température moyenne minimale de 21.4°C et 22.2°C pour les mêmes mois.

Une période douce qui s'étend du mois de Novembre jusqu' au mois d'Avril ou les températures moyennes varient entre 19.8°C et 17,7°C avec des températures qui peuvent atteindre un minimum de 6.7 °C en janvier qui est le mois le plus froid.

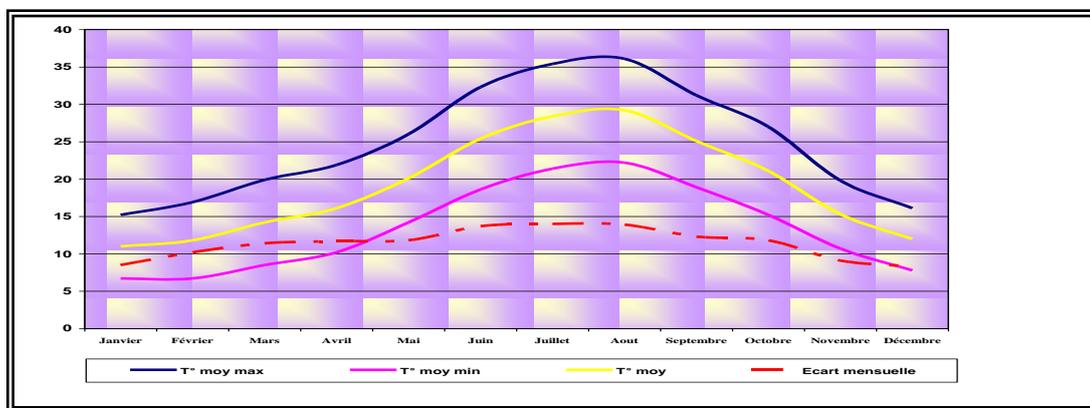


Figure V-2 : évolution de la température de l'air  
(Source : ONM, 2009)

#### V-2-1-2-2-La vitesse de l'air

Les vents dominants sont canalisés par la forme du relief. En période hivernale (novembre -Avril) les vents viennent de la direction Ouest, caractérisés par le passage des masses d'air arctique l'emportent généralement et déterminent une saison froide et humide. En été, les vents engendrés sont de direction Ouest Nord Ouest (vent dominant ONO 2.21 m/s) provenant du littoral, comme elle subie l'influence des vents très chaud et sec de Sud- Est « Le sirocco » a lieu généralement en été [MES 83]. Les vents locaux sont faible (le mousson de barrage, la brise de terre coté foret Rejaouna).

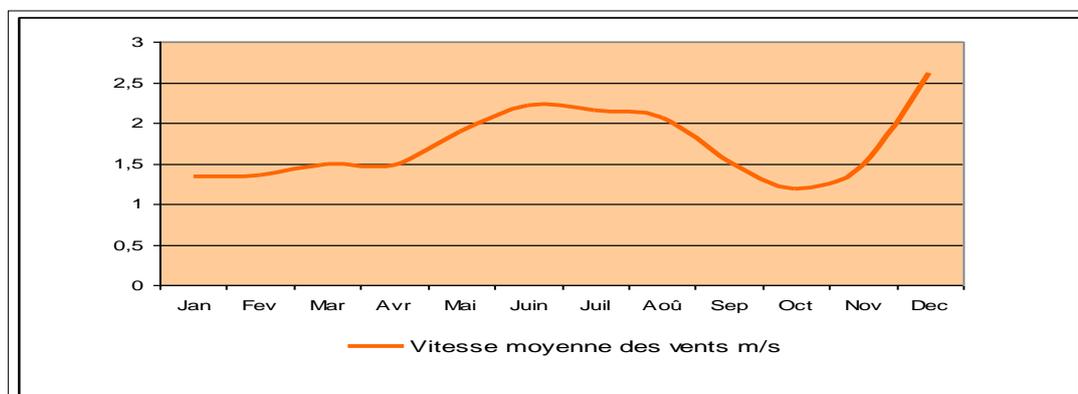


Figure V-3 : la vitesse du vent  
(Source : ONM, 2009)

#### V-2-1-2-3-L'humidité relative

L'humidité est relatif à la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau La vapeur d'eau entre dans la composition de l'air par vaporisation, principalement à partir de la surface des océans,

Mais aussi à partir des surfaces humides, de la végétation, et des petites plans d'eau .la vapeur est véhiculée et distribuée sur la surface de la terre par les vents.

D'après la comparaison entre les tableaux de température et d'humidité on constate que le taux d'humidité pendant la période froide est plus élevé par rapport à celui de la période chaude avec une moyenne maximale de 93.5%.

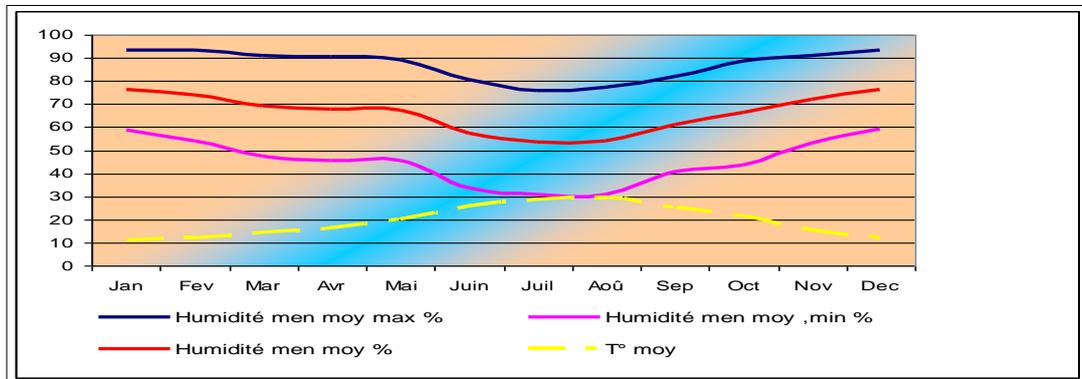


Figure V-4 : Humidité relative  
(Source : ONM, 2009)

#### V-2-1-2-4-Précipitation

Les précipitation résultent de refroidissement adiabatique de vaste masses d'air et son fortement affectées par la stabilité verticale de l'air»

Les pluies s'étalent du mois d'octobre au mois d'avril avec un maximum de 144.3 mm au mois de décembre, et sont souvent sous forme d'orage, avec conséquences:-Lessivage des sols. - Glissement des terrains. Et elles sont rares en période estivale.

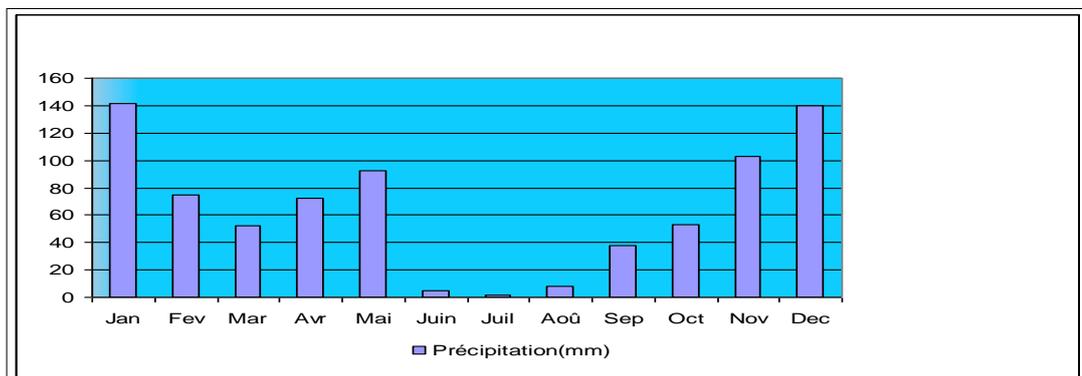
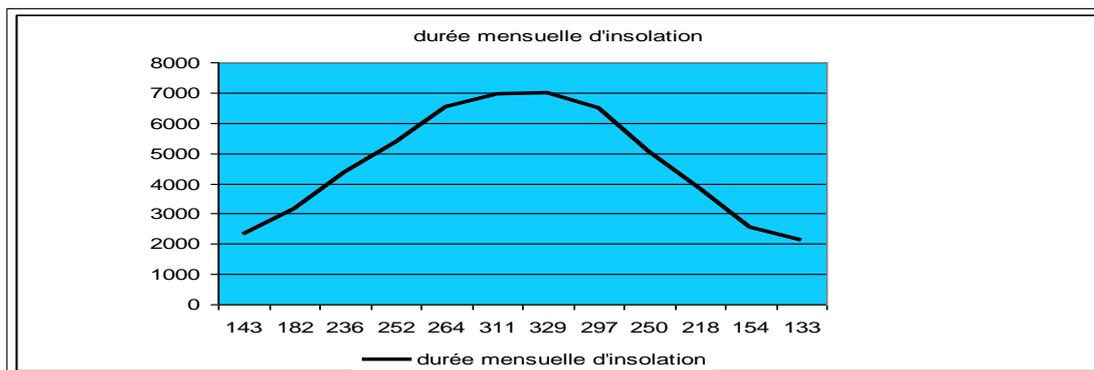


Figure V-5 : la distribution des précipitations  
(Source : ONM)

#### V-2-1-2-5-L'ensoleillement

Le rayonnement solaire est défini comme étant le déplacement de l'énergie sous forme de radiation solaire, cette radiation solaire transmet la chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques constituant ainsi le spectre solaire. Comme le rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre, son intensité est diminuée et la distribution spectrale est modifiée par

l'absorption, la réflexion et la diffusion. Pour l'énergie incidente sur un plan horizontal pour le rayonnement solaire annuel moyen est de 4646 Wh/m<sup>2</sup>/jour.



**Figure V-6** : le rayonnement global  
(Source : ONM)

### V-2-1-3-Analyse bioclimatique du site

Plusieurs études ont été faites pour déterminer les limites du confort thermique en tenant compte des paramètres climatiques et de leurs évaluations combinées.

L'évaluation des chercheurs diffère de quelques degrés, mais ces variations se compliquent selon l'individu, l'acclimatation, les vêtements, la nourriture...etc. Parmi les méthodes qui ont été développées par les chercheurs pour répondre aux besoins de l'utilisateur vis-à-vis du climat nous pouvons citer :

- La méthode de la température effective.
- La méthode de la température résultante.
- La méthode de l'indice de contrainte thermique.
- Les méthodes des diagrammes bioclimatiques de B.Givoni, V. Olgyay, S.Zockolay...Etc.
- La méthode des indices PMV et PPD.

Pour l'analyse bioclimatique de la ville de Tizi Ouzou, les méthodes des diagrammes bioclimatiques ont été choisies, elles reposent essentiellement sur l'analyse des données climatiques de la ville en exploitant les diagrammes psychrométriques de Givoni, les tableaux de Mahoney, pour ressortir enfin avec des recommandations conformes au climat de la région.

#### V-2-1-3-1-Le diagramme psychrométrique de Givoni

Le diagramme psychrométrique de Givoni consiste à évaluer les exigences physiologiques du confort, à partir desquelles, les grandes lignes de la conception du bâtiment sont déterminées

et permettent de garantir ce confort; Givoni a établi des zones d'intervention obtenues en fonction des données climatiques de chaque mois.

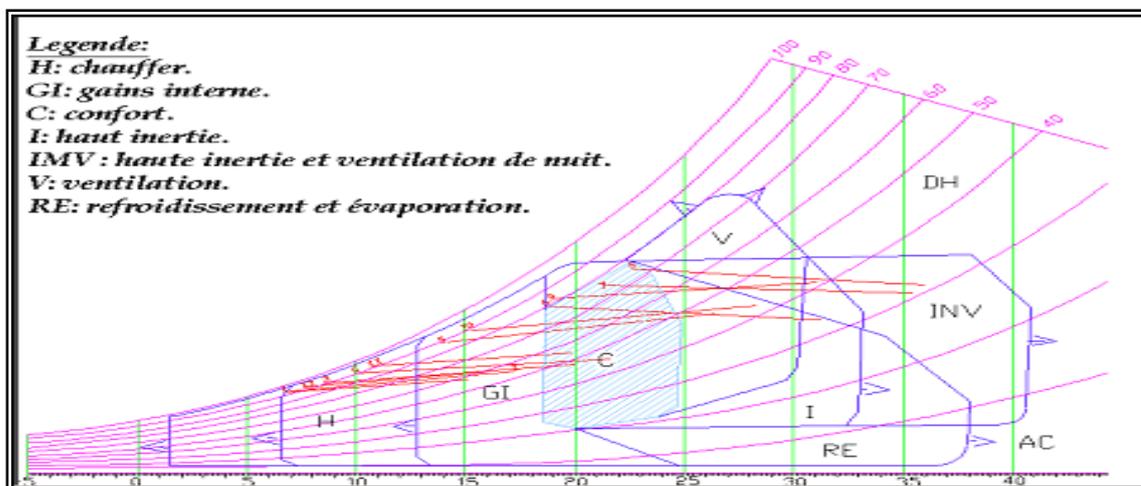
	Jan.	Fev.	mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct.	Nov.	Dec
Temp. moy men Max °C	15.2	16.9	19.9	21.9	26	32.3	35.4	36.1	31.2	27	19.8	16.1
Humidité men moy max %	93.38	93.5	90.8	90.5	88.9	80.8	76.0	77.3	81.9	88.7	91.0	93.3
Temp. moy men min °C	6.7	6.7	8.5	10.2	14.2	18.6	21.4	22.2	18.9	15.2	10.7	7.8
Humidité men moy min %	58.8	54.0	47.2	45.5	45.4	33.7	30.7	31.0	40.8	43.8	53.0	59.3

**Tableau V-1:** données climatique pour la ville de Tizi ouzou  
(Source : ONM)

**a) Interprétation du diagramme de Givoni**

D'après le diagramme de Givoni on distingue que notre analyse climatologique s'étale sur trois zones :

- 1- Zone de sous chauffe : elle s'étale sur un période de 6mois, elle comprend les mois de Janvier, Février, Mars, Avril, Novembre et Décembre.
- 2- Zone de surchauffe : elle s'étale sur trois mois : la 2 moitié de juin, Juillet, Août et la 1ere moitié du mois de Septembre.
- 3- Zone de confort : elle s'étale sur le mois de Mai, début Juin, fin Septembre et Octobre.



**Figure V-7:** diagramme psychrométrique pour la ville de Tizi Ouzou  
(Source : logiciel ecotect)

## **b. Les recommandations bioclimatiques du diagramme**

### **b1. En zone de sous chauffe**

- Promouvoir les gains internes : cela s'effectue en faisant de sorte que l'énergie solaire puissent entrer à l'intérieur de l'espace en ayant les ouvertures adéquate (moyenne : 40% de la surface du plancher) ; ensuite stocker cette énergie le jour en pensant au type des matériaux à utiliser pour la restituer la nuit.
- Orientation des espaces qui on besoin de l'énergie vers le Sud.
- L'isolation thermique : le pouvoir isolant d'un matériau est mesurer par la conductivité thermique ; plus elle est faible, plus le matériau est isolant.

### **b2. En zone de surchauffe :**

#### **- La climatisation :**

Une petite partie des mois les plus chaud : Juillet et d'Août (les plus chauds de l'année) se situe dans la zone de refroidissement actif est nécessite donc une climatisation artificielle.

#### **- La ventilation :** pour cela on aura recours à :

- L'exploitation des brises fraîches en période estivale en créant des failles en direction nord-ouest pour permettre la ventilation naturelle à l'intérieur du bâtiment.
  - Accélérer le renouvellement d'air en aspirant la fraîcheur par les ouvertures des façades à l'ombre le jour.
  - Créer des bouches de ventilation pour assurer un renouvellement d'air naturel.
- Inertie thermique :** Les constructions à façades massives régularisent les apports et les déperditions thermiques sans isolation rapportées en étalant l'action de la chaleur et du froid extérieur sur une longue durée. La masse inerte des murs réduit l'écart entre les températures intérieures maxi et mini. la totalité des mois de Juillet et Août se situe dans la zone de refroidissement passif : Ventilation naturelle, effet de masse, effet de masse avec ventilation nocturne, refroidissement évaporatif direct et indirect.

### **V-2-1-3-2-Tableau de Mahoney**

Carl Mahoney a développé une méthode de traitement des données climatiques très simple, constituée d'une suite de 6 tableaux [UNCHS 73]. Cette méthode permet au concepteur d'arriver à partir des données climatiques (Températures, Humidités relatives, Précipitations, vents.)à des recommandations de confort spécifiques au site d'intervention (Voir tables en annexe 01)

### **Synthèse des recommandations spécifiques:**

- favoriser l'orientation nord-sud.
- Occupation compacte des constructions pour éviter les déperditions.
- Les mouvements d'air ne sont pas recommandés
- Prévoir des ouvertures moyennes soit d'une dimension de 20% à 40% de la surface du plancher.
- Prévoir des murs extérieurs et intérieurs massiques.
- Opter pour des toitures lourdes.

### **Synthèse des recommandations de détail :**

- Ouvertures petites de 15 à 25% de la surface du plancher.
- Murs et planchers avec un déphasage de 8h.
- Toitures lourdes avec un déphasage de 8h.

La ville Tizi Ouzou se caractérise par un climat chaud et humide. Les fortes chaleurs concernent certes une grande partie de l'année, mais il n'en demeure pas moins que les besoins de chauffage en hivers.

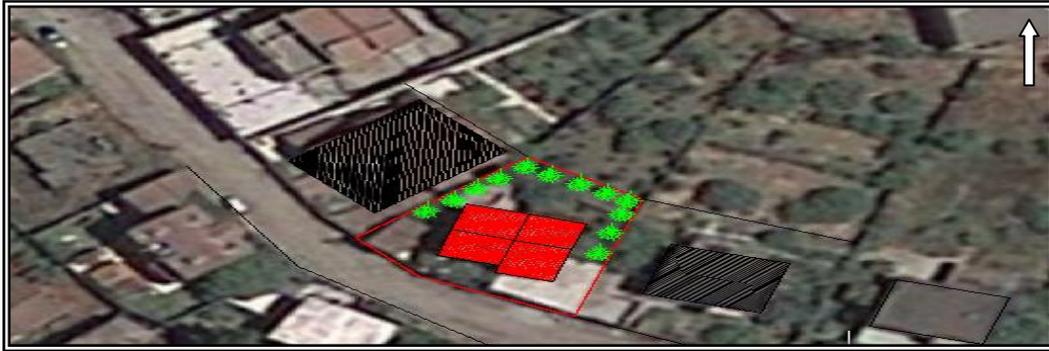
Les mois de grandes chaleurs nécessitent un rafraîchissement passif, plan compact, effet de masse et inertie thermique, ventilation nocturne et refroidissement par évaporation. Ces procédés sont indispensables pour parvenir aux conditions de confort à l'intérieur du bâtiment, surtout durant les mois de Juillet et Août qui sont les plus chauds de l'année.

Pendant ces mois, les techniques passives ne suffisent pas à elles seules à maintenir une température de confort acceptable durant toute la journée, il faut donc faire appel à la climatisation d'appoint avec une architecture appropriée qui prendrait en considération les recommandations précédemment citées. On pourrait arriver à un gain d'énergie considérable en s'appuyant sur des procédés purement passifs, et avoir recours d'une façon raisonnable aux moyens actifs.

## **V-2-2-Modélisation du bâtiment étudié**

### **V-2-2-1-Configuration spatiale du cas d'étude**

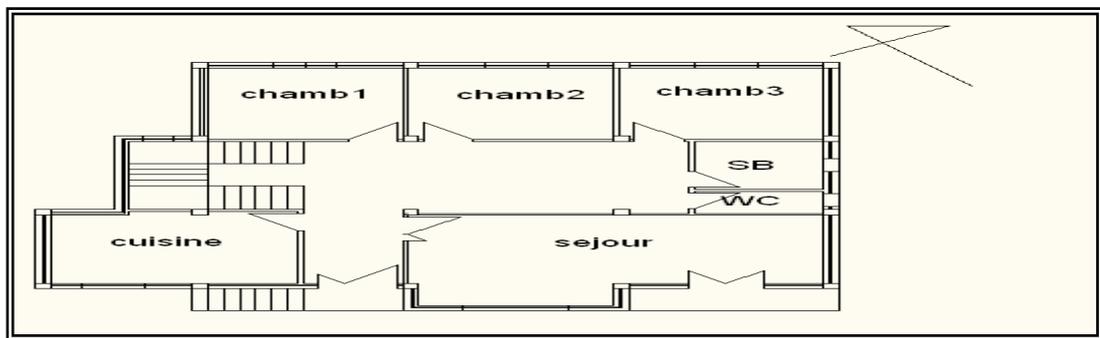
La maison choisie pour l'étude est située dans la ville de Tizi Ouzou, dans un climat chaud et humide. Elle s'insère dans un lotissement résidentiel à faible densité. Elle se développe en un seul niveau (RDC + terrasse), construite sur une cave semi enterrée, couverte par un toit terrasse accessible, dont une partie est aménagée en buanderie. Elle est ouverte sur la rue par la façade Sud-Est et sur une cour par la façade Nord-ouest.



**Figure V-8 :** Situation de la maison  
(Source : l'auteur)

### V-2-2-2-Configuration géométrique et système constructif du cas d'étude

Le type de la construction, objet de l'étude est représentative des techniques de construction les plus répandues en Algérie. La structure étudiée est de 192 m<sup>2</sup> de surface. Le niveau étudié est composée d'un séjour, 03 chambres, une cuisine, une salle de bain et WC. Elle est occupé par 06 personne , selon l'enquête sociologique.



**Figure V-9:** configuration géométrique du cas d'etude  
(Source : l'auteur)



**Figure V-10:** façade principale  
(Source : l'auteur)

### V-2-2-3-Caractéristique de l'enveloppe

L'enveloppe est constituée comme suit :

- Le système constructif est un système poteaux poutres, auto stable

- Les murs extérieurs sont des parois doubles en briques creuses avec lame d'air;
- Les murs intérieurs sont des parois simples en briques creuses ;
- La toi plat accessible : plancher à corps creux ;
- Le plancher en dalle corps creux ;
- Le vitrage est simple d'une épaisseur de 4 mm, d'une conductance hors résistances superficielles égale à  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  et de facteur solaire égal à 0.85 avec un cadre en bois;

L'enveloppe du bâtiment doit fournir un support structural aux murs et aux toits, empêcher la structure de se détériorer, permettre un éclairage naturel à l'intérieur et offrir une voie d'entrée et de sortie. En effet, l'enveloppe de la maison doit séparer l'environnement intérieur du climat extérieur. Pour protéger notre environnement intérieur, l'enveloppe doit contrôler le flux de chaleur transporté par l'air et la surface de cette dernière vers l'ambiance intérieure.

désignation	composition	Epaisseur (m)	$\lambda$ [ $\text{w/m}^2.\text{k}$ ]
Mur extérieur	1-Enduit de plâtre	0.02	0.58
	2- Brique creuse	0.10	0.45
	3-Lame d'air	0.05	0.044
	4-Brique creuse	0.15	0.45
	5-Enduit extérieur (mortier ciment)	0.02	0.7
Mur intérieur	1-Enduit de plâtre	0.02	0.58
	2- brique creuse	0.10	0.45
	3-Enduit de plâtre	0.02	0.58
Toiture terrasse	1-Enduit de plâtre	0.02	0.58
	2- Enduit ciment	0.02	0.7
	3-hourdis a corps creux	0.16	1.1
	4-Dalle pleine en béton armé	0.04	1.75
	5-Forme de pente	0.03	1.5
	6-Para vapeur	0.001	2.3
	7-Isolation (liège)	0.02	0.05
	8-Etanchéité (bitume)	0.02	0.047
	9-mortier ciment	0.02	0.7
	10- Carrelage	0.02	1.05
Plancher intermédiaire	1-Hourdis a corps creux	0.16	1.1
	2-Dalle en béton armé	0.04	1.75
	3-mortier ciment	0.02	0.7
	4- Carrelage	0.02	1.05

**Tableau V-2 :** composition de l'enveloppe  
(Source :l'auteur)

#### V-2-2-4- Les équipements

Ils sont à la fois, liés à la présence de :

- L'activité humaine, on distingue :
- Appareils électroménagers

Appareil	zone	Temps d'utilisation	Puissance (w)
Réfrigérateur	cuisine	24/24	70
Téléviseur	Salon, cham1, cham2	En occupation 12a22	150
Appareils cuisson	cuisine	En occupation par intermittence	200
ordinateur	Cham3	18-22	100
Lave linge	buanderie	2 fois par semaine	2300

**Tableau V-3** : les équipements électroménagers

(Source :l'auteur)

- Les climatiseurs : Nous considérons l'utilisation d'un climatiseur électriques dans la salle de séjour (lieu de regroupement de la famille), et dans la chambre des parents, d'une puissance de 3.5kw, avec une température de consigne égale à 26 °C en saison chaude (utilisé 05 jours par semaine pendant toute la journée).
- L'éclairage artificiel : lampes incandescente 15 à 60W et 11 à 75W ; lampes fluorescentes : 5 à 60W.

#### **V-2-2-5- Renouvellement de l'air**

Le taux de renouvellement de l'air est égal à 0.5 volume/heure, dont les occupants ouvrent les fenêtres les matins, et les soirs après 18 h. Afin d'assurer d'une part le confort dans la cuisine, et d'autre part améliorer la qualité d'air intérieur dans la cuisine, les vapeurs sont évacuées par un ventilateur (extracteur d'air) .

#### **V-2-2-6- La stratégie d'occupation**

La maison objet de notre étude, abrite six (06) personnes. Le niveau d'activité métabolique est de 1,5 met de 08 h à 23 h, et de 1 met de 23 h à 08h. En ce qui concerne la résistance thermique des vêtements, elle est égale à 0,5 clo (tenue d'été), et une vitesse relative d'air égale à 0.1 m/s. La puissance dissipée par les personnes est estimée à 120 W. On remarque le groupement des membres de la famille dans une seule pièce, l'après midi et le soir.

#### **V-2-2-7-l'évolution de la température à l'intérieure de la maison**

Il est utile de rappeler que le rafraichissement par puits provençal doit être pensée comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci avec une intégration soigneuse du concept énergétique qui doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes (éclairage, appareils,..), ainsi qu'une estimation de la consommation électrique des auxiliaires. Pour se faire, une campagne de mesure qui s'est déroulée le 01 et le 02 juillet 2009, dans le souci de dresser un bilan thermique pour déterminer les actions nécessaire à entreprendre pour procurer un ambiance

thermique satisfaisante pour les occupants en été, sachant que l'amélioration de l'ambiance thermique intérieure se réalise, en période estivale, par :

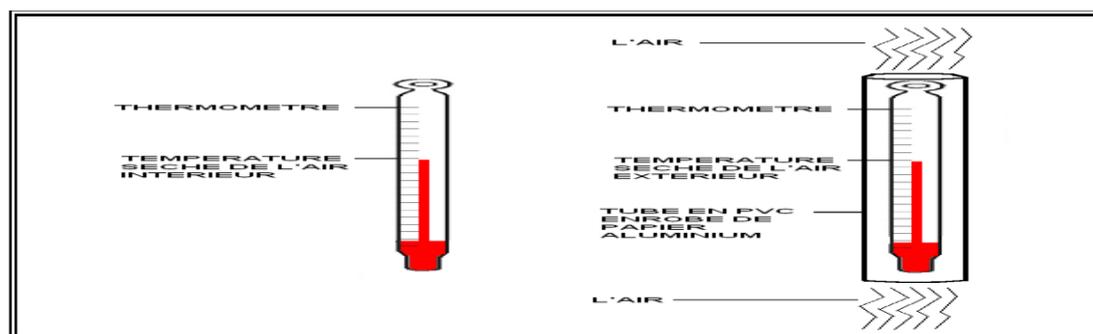
- Contrôler les apports solaires (actions sur l'enveloppe du bâtiment)
- Diminuer les apports internes
- Augmenter le coefficient G1 (isolation)
- Dissiper le surchauffe par augmentation du débit de ventilation (ce qui est utile que quand la température extérieure est plus fraîche que la température intérieure).

#### V-2-2-7-1-Mesure des températures moyennes extérieures et intérieures

Afin de prendre en compte l'effet de l'enveloppe du bâtiment (inertie, l'isolation thermique), l'effet de l'orientation (les apports solaires), l'étanchéité de l'enveloppe à l'air (les apports par renouvellement d'air) et les apports internes, sur l'ambiance thermique intérieure, il est nécessaire de connaître les caractéristiques thermique de l'air ambiant qui occupe le volume bâti ( $459\text{m}^3$ ). De ce fait, On a relevé pendant une période de vingt quatre (24) heures les températures à l'intérieur et à l'extérieur de maison (le séjour). La prise de température a commencé à midi, 12h00, de la journée du 01/07/2009 jusqu'à midi, 12h00, de la journée du 02/07/2009. On a pris les températures sèches et les températures humides à l'intérieure et à l'extérieure de la maison (thermomètre placé au milieu de la salle de séjour). Les températures sèches et humides ont été mesurées à l'aide de thermomètres traditionnels (thermomètre placé à l'extérieur du bâtiment).

##### V-2-2-7-1-1-Mesures de températures sèches

C'est la température qui se lit en abscisse sur le diagramme psychrométrique. Pour la prise des températures sèches, on a pris deux thermomètres. L'un a été suspendu à l'intérieur de la maison, l'autre a été suspendu à l'extérieur de la maison. Ce dernier pour prendre les températures de l'air uniquement et pour réfléchir les rayons solaires, il a été mis dans un tube en PVC couvert par un papier aluminium.



**Figure V-11:** Prototypé de mesure de la température sèche à l'intérieur et à l'extérieur de la maison (Source : [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com))

Les mesures prises sont résumées dans le graphe ci après .

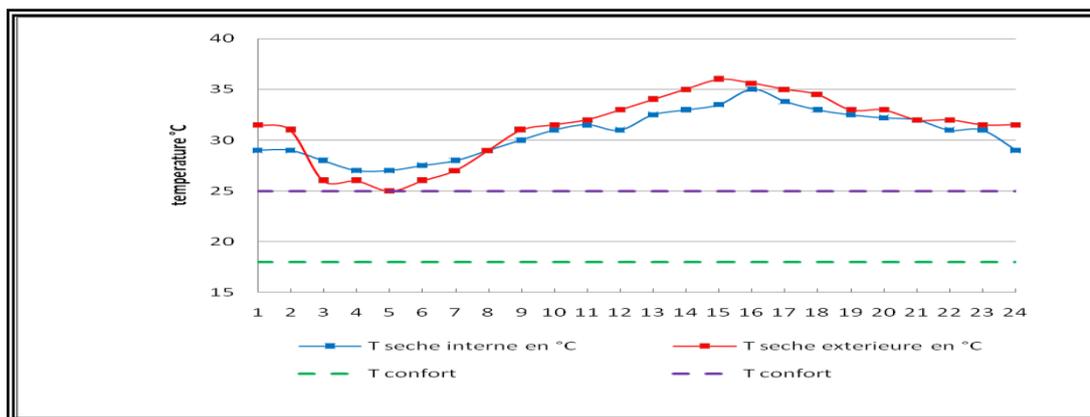


Figure V-12 : l'évolution journalière dans la température sèche de l'air a l'intérieure de la maison (Source : auteur)

### V-3-2-7-1-2-Mesures de températures humides

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est humidifié. Pour calculer la température humide, on projette orthogonalement l'axe des températures sèches sur la courbe de saturation. La température humide se lit sur la courbe de saturation du diagramme et se déplace suivant une oblique. Elle est exprimée en °C. Pour la prise des températures humides, on a pris deux thermomètres. L'un a été suspendu à l'intérieur de la maison dont le bulbe est lié à un lacet en coton, inséré dans une bouteille remplie d'eau. En absorbant de l'eau par capillarité ce dernier sera constamment imbibé d'eau. Ce système permet au thermomètre de mesurer les températures humides internes au lieu des températures sèches internes. Le deuxième il a été suspendu à l'extérieur de la maison, lié, de la même manière, à un lacet en coton constamment imbibé d'eau. Ce dernier a été placé pour prendre uniquement les températures de l'air et pour réfléchir les rayons solaires il a été mis, comme pour le thermomètre des températures sèches dans un tube en PVC et a été couvert par papier aluminium.

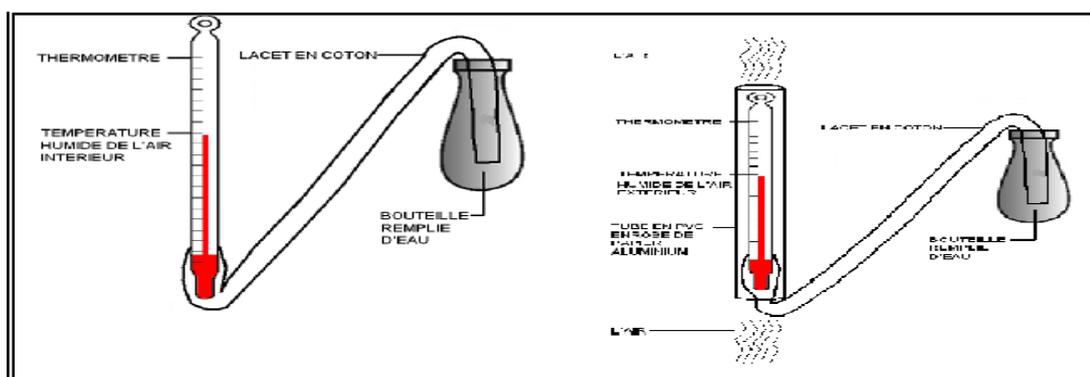
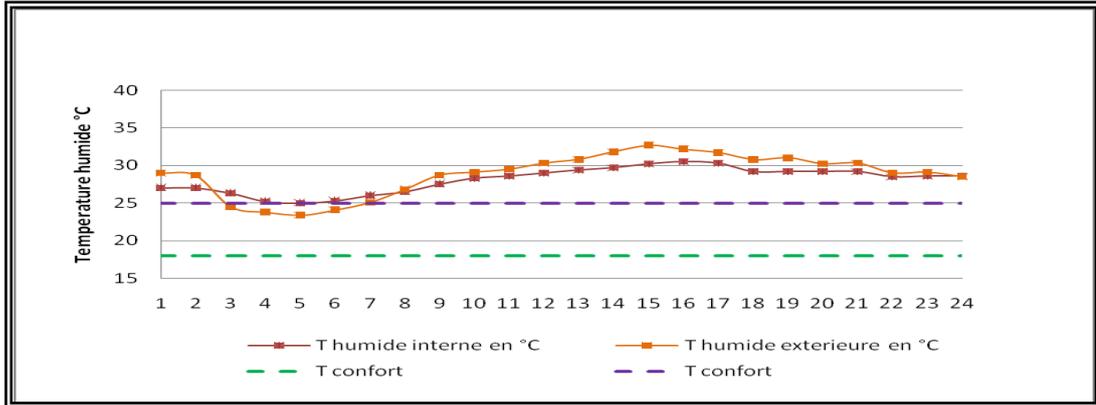


Figure V-13 : Prototypage de mesure de la température humide à l'intérieur et à l'extérieur de la Maison (Source : www .wikipedia.com)

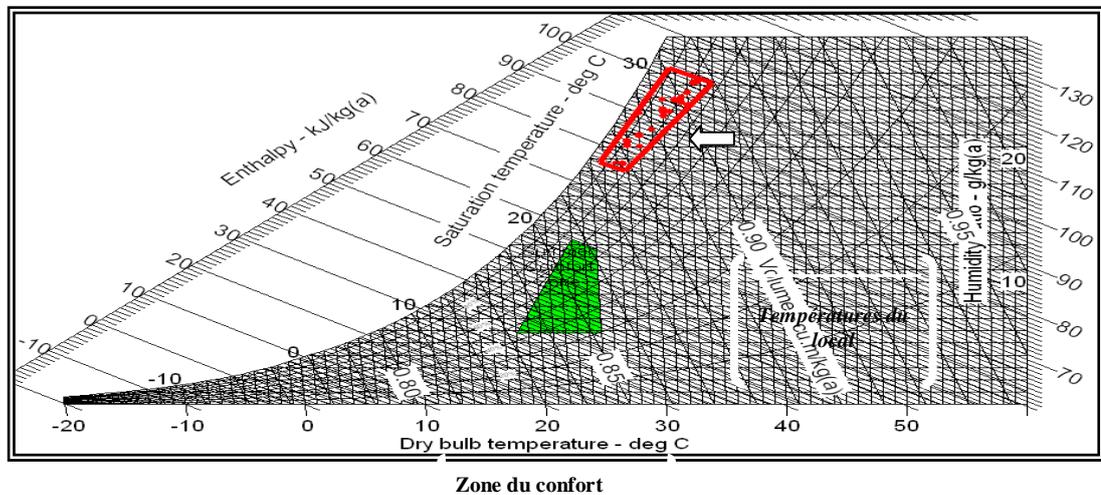
Les mesures prises sont résumées dans le graphe ci après (figure V-19) :



**Figure V-14 :** l'évolution journalière dans la température humide de l'air a l'intérieure de la maison (Source : auteur)

### V-2-2-7-1-3-Les caractéristiques de thermique de l'ambiance (diagramme psychrométrique)

L'ambiance intérieure se situe toute la journée dans la zone de surchauffe avec un maximum de 35°C° (en dehors de la zone du confort : taux d'humidité très élevé,



**Figure V-15 :** Les caractéristiques thermiques de l'ambiance de la maison

(Source : logiciel CYTSoft)

### V-3-2-7-1-4-L'interprétation des résultats de la campagne de mesure

Le comportement thermique d'un bâtiment est complexe et dépend des sollicitations auxquelles il est soumis telles que la température de l'air extérieur, l'échange radiatif avec son environnement, le transfert de masse, les divers flux de chaleur qui règnent à l'intérieur.

Les résultats obtenus illustrées par Les figures : V-18, V-19, V-20 nous indique que la maison est sous l'influence de charges thermique de différentes sources :

- **Charges dues à l'environnement intérieur**

Elles proviennent des dégagements à l'intérieur du local. Essentiellement elles ont pour origine

- les occupants, les appareils électriques, l'éclairage.

- **Charges dues à l'environnement extérieur**

Elles sont classées en trois catégories:

- Les charges dues aux infiltrations d'air extérieur
- Les charges dues au rayonnement solaire à travers les fenêtres.
- Les charges dues aux échanges thermiques à travers les parois extérieures opaques (murs extérieurs et toiture) ou vitrées.

La température sèche intérieure oscille entre un minimum de 27 °C à 04 h et un max de 35 °C à 16 h. Alors que la température extérieure a enregistré une valeur maximal à 16 h de 35.6°C et un minimum de 25°C à 6 h.

On remarque que la courbe des températures internes suit le mouvement de la courbe des températures externes, ainsi pendant 03 :00 et 04 :00 du matin la température interne est plus élevée que la température externe. Ce qui veut dire que le mur n'a pas une bonne inertie. Alors l'inertie thermique pendant le jour qui devait se comporter en amortissant la fluctuation de la température extérieure, et en la déphasant dans le temps notamment pour les façades : Sud, Ouest et la toiture.

Ces variations dépendent de quatre facteurs

- L'amplitude de température extérieure (différence  $T_{max} - T_{min}$ ), donnée climatique
- L'inertie thermique du local
- Les apports solaires : ces apports étant diurnes, ils contribuent à relever sélectivement les températures diurnes, c'est-à-dire augmenter  $A_i$ . Cette augmentation de  $A_i$  (amplitude) sera d'autant plus marquée que l'inertie thermique est faible.
- La ventilation du local, qui peut : soit restituer l'amplitude extérieure ( si la ventilation est forte et permanente) , Soit laisser agir l'amortissement (ventilation nulle), Soit conduire à une situation intermédiaire (ventilation diurne ou nocturne)

On peut donc dire à priori, pour une amplitude extérieure donnée et une ventilation faible que :

- Avec les apports solaires et une faible inertie thermique,  $A_i$  et  $V_{Ti}$  seront importants.

Puisque l'enveloppe du bâtiment est caractérisée par une inertie faible, il y a lieu de signaler que les apports solaires provenant de la toiture, les apports solaires reçus par la façade Ouest et Nord Ouest par renouvellement d'air pendant la journée et l'accumulation des gains internes sont les sources principales qui affecte gravement l'ambiance thermique en créant des ambiances intolérables pour les occupants (l'effet de l'humidité relative).

A cet effet, le puits Provençal présente une solution efficace pour éliminer les apports thermique par renouvellement d'air avec une bonne gestion des gains interne et des apports solaires : l'isolation thermique par l'extérieure recommandée), dont le but est de procurer une température de 21 C° a l'intérieure du bâtiment.

### **V-2-3-La modélisation thermique du sol**

Notre zone d'intervention a fait l'objet d'une étude géotechnique, dans sa partie Sud, élaborée par le laboratoire CTE GEOMICA en 2003 et contrôlée par la DUC de TIZI-OUZOU et le CGS, concerne l'ensemble de la partie Sud du POS PU 7. En effet, le terrain est caractérisé par une morphologie assez irrégulière où quatre classes de pentes principales ont été définies [DUC, Tizi ouzou, 2006]<sup>1</sup>.

Du point de vue géologique, le site est constitué de terrains marneux du Miocène post nappes du bassin de TIZI-OUZOU. Les observations de surface et les résultats de la reconnaissance géotechnique effectuée ont révélée que la lithologie du site est représentée par une formation marneuse, de couleur bleue à grisâtre, compacte et très indurée en profondeur et surmontée en surface par une couverture argileuse plastique et peu consistante, de couleur brune à verdâtre. Le passage du substratum marneux vers la couverture argileuse est marqué par la présence d'un niveau de marne altérée et oxydée de couleur ocre et verdâtre, moyennement consistante. La couverture argileuse est surmontée par endroits par des remblais de nature argileuse et marneuse ; ces remblais présentent d'extensions limitées et des épaisseurs très variables.

Du point de vue hydrogéologie, la nature argileuse et marneuse qui caractérise le site ne permet pas la mise en place de nappe importante. Toutefois, une eau d'infiltration circule à travers la couverture argileuse et la marne fissurée et resurgis le plus souvent au contre bas des versants.

Sur le plan géotechnique, l'analyse des résultats de l'investigation géotechnique entreprise a permet d'identifier les caractéristiques physico-chimiques de chacune des formations géologiques rencontrées.

#### **V-2-3-1-Conductivité thermique du sol**

Ce paramètre joue sur la profondeur de pénétration du signal thermique à l'intérieur du sol et. Par conséquent, il modifie l'atténuation de l'amplitude, le déphasage du signal de température du sol et l'efficacité globale de l'échangeur. Lorsque la conductivité du sol est

---

<sup>1</sup> DUC, Tizi ouzou.(2006) : « **rapport 2eme phase plan d'occupation du sol PU 07 ville de Tizi ouzou** », direction de l'urbanisme et de la construction de la wilaya de Tizi Ouzou.

faible, l'amplitude de variation de la température en sortie d'échangeur est plus élevée (Figure V-13). Il est important de noter qu'un sol argileux marneux sur lequel est érigé notre cas d'étude, est à faible conductivité, par conséquent, il isole mieux les tubes de l'échangeur des conditions extérieures ce qui limite l'amplitude de variation de la température du sol et la température atteinte en été en sortie d'échangeur. Finalement, c'est cette propriété qui semble préférable pour réduire la surchauffe en été.

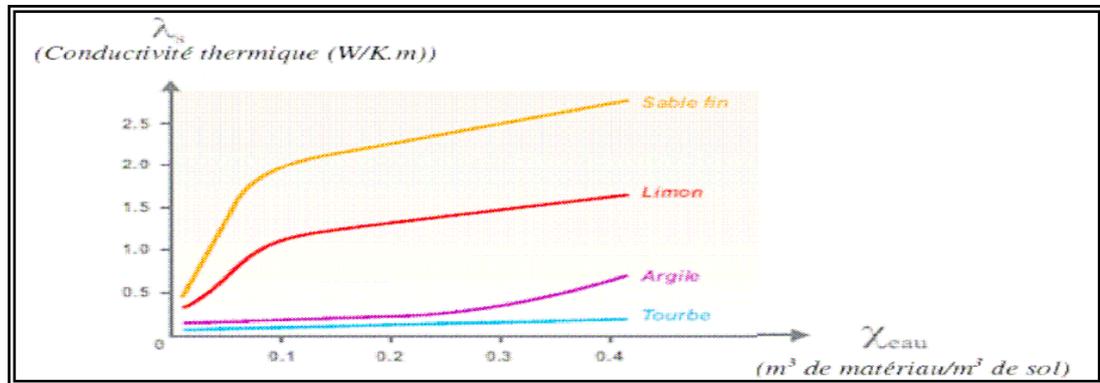


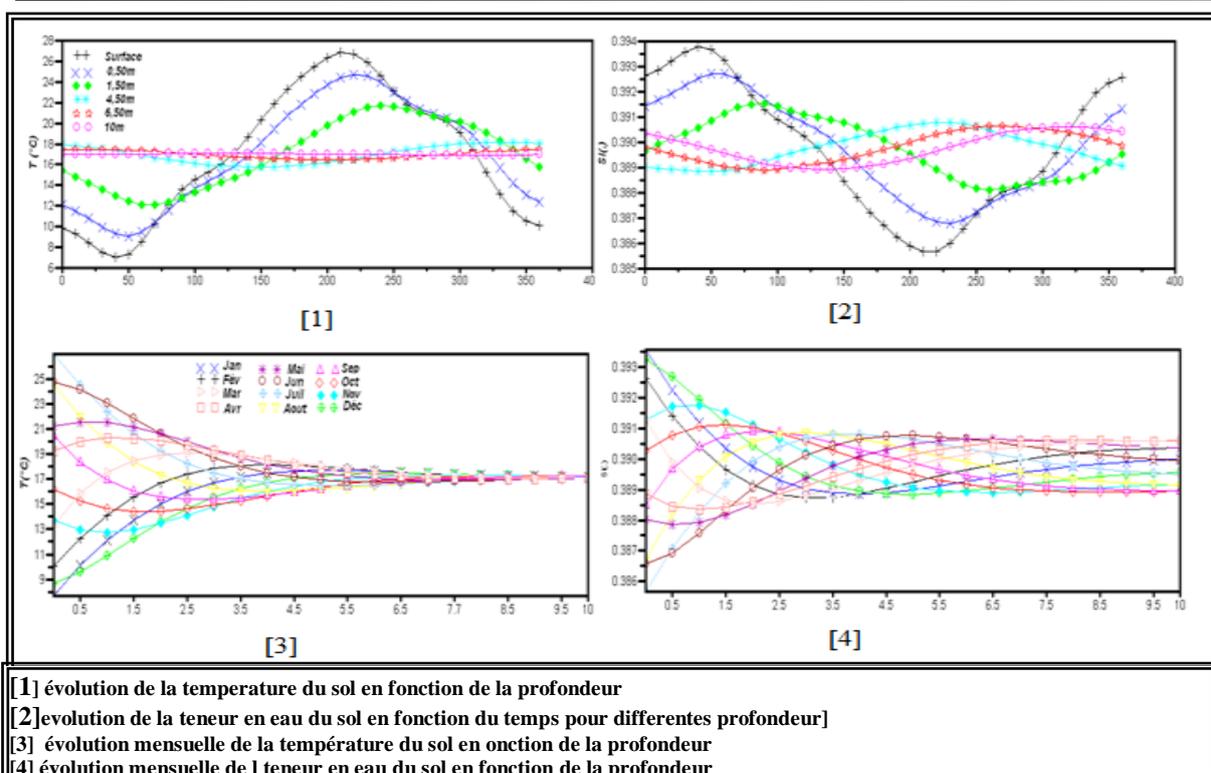
Figure V-16 : conductivité thermique du sol  
(Source : Hollmuler, 2002)

### V-2-3-2-Nature de la surface du sol

La part du rayonnement solaire absorbé par la surface du sol dépend de la nature de la surface du sol. Pour un sol très absorbant, la température du sol sera plus élevée que si le sol est peu absorbant réfléchissant, en particulier lors des périodes où le rayonnement solaire est important (été). En pratique, la surface du sol est souvent très absorbante (gazon, sol nu, gravier, béton ou asphalte)[Trombe, 1991]. La maison objet de notre étude donne sur un jardin couvert en gazon, ce qui nous permet de considérer comme un sol absorbant (albédo : 0.1 à 0.3).

### V-2-3-3-Humidité à la surface du sol

L'humidité de la surface du sol influe sur les échanges latents intervenant entre l'air extérieur et la surface du sol. Ces échanges sont de moindre importance par rapport aux échanges par convection ou par rayonnement ce qui explique le fait que ce paramètre soit peu influent vis-à-vis de la température du sol et de la température en sortie d'échangeur. la nature argileuse et marneuse qui classe notre site d'intervention parmi les sol humide, sachant bien que qu'il plus inertielle qu'un sol sec. Cet effet doit être mis a profit pour augmenter la performance de l'échangeur thermique air/sol.



**Figure V-17:** Evolution annuelle de la température de sol pour la région de Tizi Ouzou en fonction de la profondeur et de la teneur en eau  
 (Source : Kaced et Nebbali, 2009)

Pour conclure cette analyse, la nature du sol de la construction (conductivité thermique, la nature de la surface sol et l'humidité du sol) est propice à l'intégration d'un échangeur air /sol pour rafraîchir l'air de renouvellement du bâtiment, dont la température à 03 mètres de profondeur est de 17°C.

Nature	argileux
Conductivité thermique	1.28 w.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>
Masse volumique	1500 kg.m <sup>-3</sup>
Capacité thermique	880 j.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Nature de la surface	Gazon,
humidité	humide
Exposition au vent	normal

**Tableau V-04 :** Les caractéristiques thermique du sol  
 (source : logiciel GAEA)

### V-3-3-4-Les caractéristiques du tube

Les paramètres a qui interviennent sont:

Nature	PVC
Conductivité thermique	$0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Masse volumique	$790 \text{ kg.m}^{-3}$
Capacité thermique	$1520 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Epaisseur du tuyau e(m)	0,06
Diamètre intérieur di(m)	0,188
Diamètre extérieur de (m)	0,2

**Tableau V-5** : Les caractéristiques thermique du tube  
(source : logiciel GAEA)

### V-4-La simulation

**Scilab** est une plateforme de simulation multi-domaines servant à la modélisation de systèmes dynamiques. Elle se présente comme une interface graphique du logiciel **MATLAB** permettant une représentation des fonctions mathématiques et des systèmes sous forme de diagrammes en bloc. C'est un environnement modulaire convivial développé dans un langage de programmation simple propre à MATLAB et qui utilise son solveur matriciel. Le modèle est traité en tant que donnée. La caractéristique principale d'un environnement de simulation modulaire réside dans le fait que les modèles mathématiques sont interchangeables, l'environnement permet donc à des modèles radicalement différents d'être utilisés pour décrire le même phénomène physique.

Par la présente simulation, nous souhaitons vérifier que nous obtiendrons bien à la sortie du tuyau une température de sortie de 21°C en fonction de la longueur de tube. Pour cela, nous allons établir un système d'équations pour déterminer la longueur de tube. Puis nous allons regarder ce qui se passe à la sortie du tuyau à chaque élément  $\Delta L$  et voir comment décroît la température et si celle-ci tend vers une température stable de 21°C. La longueur du tube est donnée par l'application Excel suivante développée par le laboratoire de mécanique et énergétique de l'université de Tizi Ouzou.

Diametre exterieure (de)	200
Diametre interieure (di)	188
E	6
Surface intérieure de tube si (mm <sup>2</sup> )	27745,04
Surface intérieure de tube (si en m <sup>2</sup> )	0,02774504
Surface extérieure de tube (se : mm <sup>2</sup> )	31400
Surface extérieure de tube (se en m <sup>2</sup> )	0,0314
Si/m	590,32
Se/m	628
Vol hab (m <sup>3</sup> )	459
Taux (Vol/h)	0,5
Qv (m <sup>3</sup> /h)	229,5
Qv (m <sup>3</sup> /s)	0,06375
vitesse (m/s)	2,297707987
Conductivité (W/mK)	0,16
Rcd/l (m.K/W)	0,059713376
Rcd/l (m.K/W)	0,061579821
coef conv (W/m <sup>2</sup> K)	10,79764016
Rcv (m.K/W)	0,156885806
Rtot(m.K/W)	0,218465626
Tsol (°C)	17
Tair (°C) sortie	21
Tair (°C) entrée	35
Tair (°C) moy	22
Flux/l (W/m)	22,88689569
Masse volumique air (Kg/m <sup>3</sup> )	1,2
chaleur massique (KJ/Kg.K)	1006
longueur du tube (m)	39.5

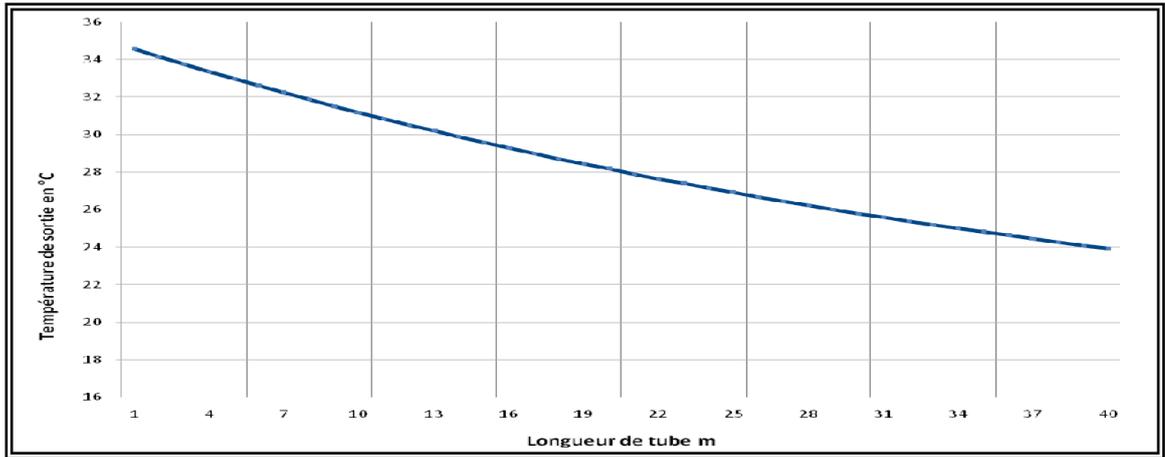
**Tableau V-06** : interface de l'application de calcule de la longueur de tube

(source : laboratoire de recherche mécanique et énergétique université Tizi ouzou, 2009)

### V-5-Les résultats de simulation

On prend une longueur de tuyau arrondi à 40 m, on remarque que la température tend vers les 24°C

On remarque aussi qu'avec le programme Scilab (annexe 3), le graphe tend vers la même température à 40m et que si on regarde sur une plus grande longueur la température se stabilise.

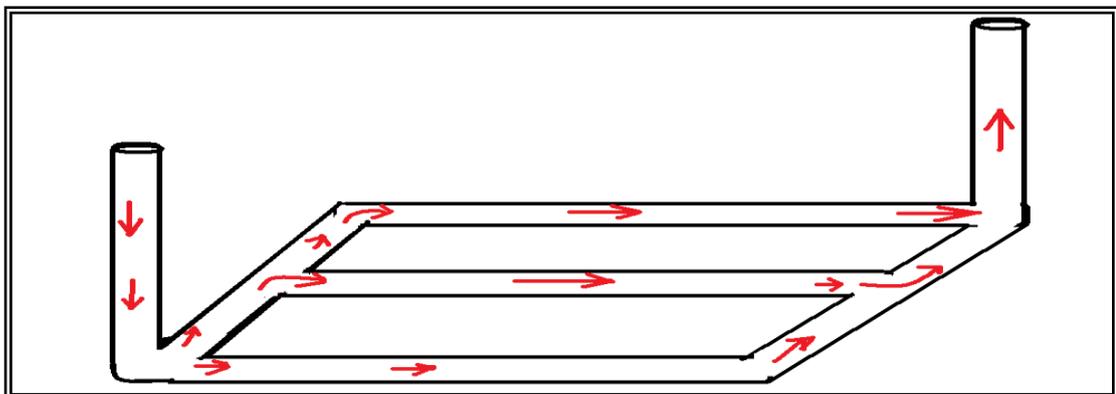


**Figure V-18:** L'évolution de la température de sortie pour une configuration à un seul tuyau pour une longueur de 40m (Source : l'auteur, langage Scilab)

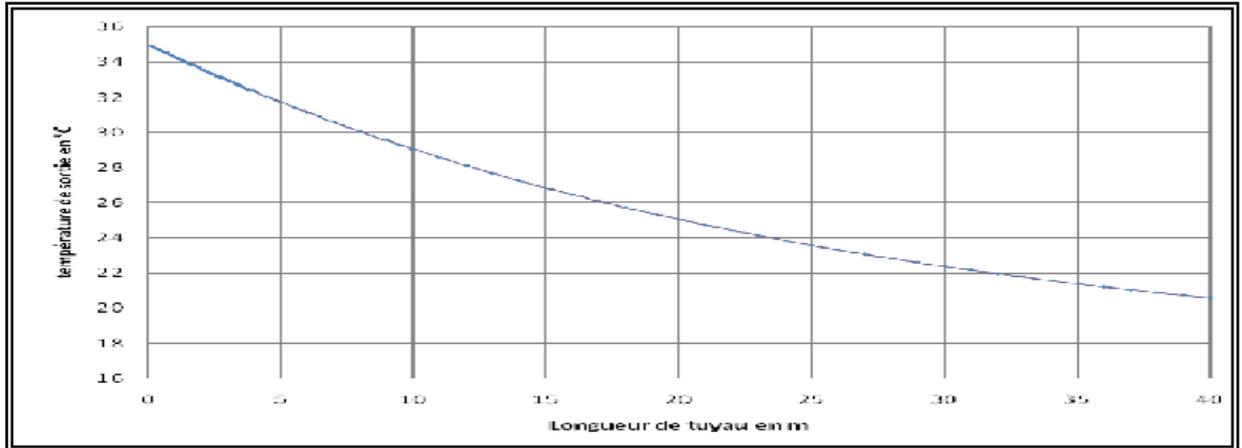
En retenant cette configuration avec un seul tuyau on obtient une température de sortie de 24°C, ce qui est loin de la température souhaitée. Pour cela, on opte pour une configuration à trois tubes, ce qui donne :

- On divise le débit par 3 pour se faire on fait intervenir 3 tuyaux c'est-à-dire qu'on part d'un tuyau principal puis on le raccorde à 3 autres tuyaux de 40m
- On laisse le débit initial et on regarde la température sur une plus grande longueur de tuyau.

On constate qu'il faut que la vitesse ne soit pas trop importante ce qui semble normal car ainsi la molécule d'air a le temps de se refroidir en passant plus de temps dans le conduit. Et, on peut remarquer qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une trop grande longueur de tuyau. L'essentiel de l'échange se fait sur les premiers mètres du tuyau.



**Figure V-19:** répartition de en 03 tubes (Source : l'auteur, langage Scilab)



**Figure V-20** : L'évolution de la température de sortie pour une configuration  
En trois tuyaux pour une longueur de 40m  
(Source :language Scilab)

### V-5- Conclusion

Pour conclure, les dimensions choisies pour le puits provençal qui va être mis en place sont : un tuyau de départ (tuyau principal) allant jusqu'à 3m de profondeur où se situe la température de sol de environ 17°C, que l'on raccorde à 3 tuyaux de 40m de longueur car on divise ainsi le débit de départ par 3(avec une vitesse plus lente cela permet à l'air d'avoir le temps de se refroidir et d'atteindre la température souhaitée) et à la sortie de ces 3 tuyaux, ils sont de nouveau raccordés à un tuyau qui va remonter à la maison sur une profondeur de 3 m. A noter que les pertes de charge pour ce type d'agencement ne sont pas très importantes, et que le diamètre sera choisi par l'architecte sachant que nous avons vu que plus le conduit à un diamètre important plus les pertes de charges diminueront.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude du potentiel de rafraîchissement d'une ambiance en utilisant un système de rafraîchissement passif basé sur les énergies renouvelables, à savoir l'énergie présente dans le sol adjacent, appelé communément géothermie de surface exploitée par le moyen d'un puits provençal qui met en valeur le potentiel géothermique existant en surface de chaque point de notre terre-que l'on installe en amont du système bâti basées essentiellement sur la valorisation de la conception bioclimatique.

Dans le premier chapitre, nous avons défini les impacts de la climatisation du bâtiment de l'échelle planétaire jusqu'à l'échelle de l'individu et montré la nécessité de limiter le recours à ces installations tout en préservant des conditions de vie satisfaisante pour les occupants.

En suite, tout en s'inscrivant dans la problématique de l'économie d'énergie dans le bâtiment, matérialisée par l'apparition de nouveaux concepts qui tentent de s'intégrer dans une démarche environnementale plus ingénieuse liée à la notion du Eco bâtiment (bâtiment performant,...) qui repose sur deux grands leviers qui améliorent l'efficacité énergétique dans le bâtiment [Morillon, 2005], et ce par :

- Le recours aux énergies renouvelables
- L'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment
- Le recours aux systèmes de rafraichissement passifs

Le recours à l'utilisation de systèmes de rafraichissement passifs contribuera forcément à la préservation de l'énergie fossile pour les générations future ainsi à limiter l'impact de cette dernière sur l'environnement. Le puits provençal est l'une des solutions qui peut être utilisée pour atteindre ce but.

Cette techniques adoptée dans l'architecture traditionnelle est d'actualité et réintégré dans des projets contemporains, tout en apportant des améliorations architecturales et techniques afin de s'adapter dans une architecture moderne et pour une société en plein changement.

Et après avoir expliqué les techniques alternatives aux machines frigorifiques à faible impact environnemental et les leviers pour améliorer le confort d'été dans le bâtiment (la protection solaire, la maîtrise des apports internes, l'inertie et la ventilation) qui visent à maintenir la température ambiante à l'intérieur de la zone du confort, on a traité en détails les composantes de puits provençal intégré dans le bâtiment, ce qui nous a permis par la suite, de développer le model :bâtiment – échangeur air/sol, qui utilise l'inertie du sol pour rafraichir

l'air extérieur véhiculé dans des tubes enterrés, dont la bouche d'entrée recueille l'air extérieur et celle de sortie est reliée au système de ventilation contrôlée du bâtiment. Cette technique est vue et pensée comme partie intégrale du bâtiment et non pas comme un système à rajouter à celui-ci avec une intégration soignée du concept énergétique qui doit donc impérativement inclure le bâtiment (inertie, protections solaires) et la gestion des gains internes (éclairage, appareils,...), ainsi qu'une estimation de la consommation électrique des auxiliaires.

En effectuant des simulations implémentée dans un environnement modulaire « Scilab » pour une journée de référence sur une maison individuelle située dans la ville de Tizi Ouzou dont l'objectif est d'avoir une température ambiante de 21°C, les résultats de simulation pour le dimensionnement du puits provençal qui va être mit en place sont : un tuyau de départ (tuyau principal) allant jusqu'à 3 m de profondeur où se situe la température de sol à 17°C, que l'on raccorde à 3 tuyaux (diamètre 200 mm) de 40 m de longueur et à la sortie de ces 3 tuyaux ils sont de nouveau raccordés à un tuyau qui va remonter à la maison de 3 m de hauteur.

En effet, pour maintenir l'ambiance à l'intérieur de la zone du confort, il est recommandé de :

- Contrôler les apports solaires (augmentation de l'isolation thermique de la toiture, des façades, les protections solaires des fenêtres (protection horizontales et verticales).
- Augmenter l'inertie thermique des parois (surtout la toiture) et prévoir l'isolation des parois par l'extérieur.
- Contrôler les apports internes,
- Eviter les mouvements d'air pendant la journée
- Coupler ce système à une ventilation double flux pour mieux contrôler les flux échangés afin d'assurer une bonne étanchéité à l'air (coût d'exploitation très élevé mais coût de fonctionnement est insignifiant).

En conclusion, Ce modeste travail vise à illustrer la démarche d'intégration de la composante énergétique dans le bâtiment, voir la combinaison : énergie renouvelable (géothermie de surface) – bâtiment pour pallier au problème de surchauffe par le biais d'un puits provençal du fait qu'il s'inscrit parfaitement dans la démarche adoptée pour des bâtiments performants vu ses qualités :

- Economiques : Faible consommation électrique avec une alimentation photovoltaïque tout à fait envisageable.
- Ecologiques : elle n'utilise pas de fluides frigorigènes, ni de compresseur et consomme peu d'électricité.

- La maintenance restreinte.

- Indicateurs de coût (par rapport à un système de climatisation classique) :

L'investissement est en fait reporté sur l'enfouissement des puits dans le sol.

Coûts énergétiques : très faibles.

Coûts de maintenance: très faibles.

## Bibliographie

[ADEM et CSTB, 2005]

**ADEM et CSTB. (2005)** « guide technique de l'isolation thermique: Performances énergétiques des éléments opaques et transparents », publication CSTB et adem

[Adnott. (1999)]

**Adnott, J. (1999)** «energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC) Study », Directorate General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities.

[Adolphe, 1998]

**Adolphe, L. (1998):** "Ambiances architecturales et urbaines", édition Parenthèses, 251p

[Akbari et al, 1997]

**Akbari, H. Bretz, S. Kurn, D.M. Hanford, J. (1997)** «Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs», Energy and Buildings.

[Al Ajmi et al, 2005]

**AL AJMI, F. LOVEDAY, D.L et HANBY, V.I. (2005):** «The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate», Building and Environment. Vol. 41

[Allard et al, 1998]

**Allard, F et Santamouris, M. (1998)** «Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook », édition: James and James Ltd, 368p.

[ALVAREZ et al, 1992]

**Alvarez, S. Cejudo, J. Guerra, J. Molina, J. Rodriguez, E. Velazquez, R. (1992)** «Control climatico en espacios abiertos». El proyecto EXPO'92, Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla, .

[Amitrano, 2006]

**Amitrano, D. (2006)** «Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien », publication de Université J. Fourier, Grenoble.

[Andre et al, 2003]

**Andre, P. Deliste, C, E et Reveret, J, P. (2003)** «Processus, acteurs et pratique pour un développement durable, L'évaluation des impacts sur l'environnement », 2e édition, Ecole Polytechnique de Montréal.

[APRUE. 2007]

**APRUE. (2007)** « consommation finale de l'énergie, chiffre clef année 2005 », bulletin de l'Agence nationale pour la Promotion et Rationalisation de l'utilisation de l'Energie, Alger, 12p.

[APRUE. 2009]

**APRUE. (2009)** « Bulletin trimestriel de l'APRUE », N° 15 / Juin 2009.

[Asaeda et al, 1994]

**Asaeda, A. Ca, V.T., Akio Wake, A. (1994)** « Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere, Atmospheric environment? », Vol. 30, No. 33.

[ASHRAE, 1966]

**American Society of heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, (1966)** «Thermal Comfort Conditions », ASHRAE Standard, New-York.

[ASHRAE, 1997]

**ASHRAE. (1997)** « Thermal comfort », ASHRAE hand book fundamentals, SI edition, Atlanta.

[ASHRAE, 2004]

**ASHRAE. (2004)** «Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Standard 55-2004», American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.

[AssoHQE 2006]

**AssoHQE. 2006** « principe de HQE », Site internet. URL : <http://www.assohqe.org/>

[Atif, 1987]

**Atif, M-R. (1987)** «Passive cooling systems in architecture: physical process, climatic and functional applicability», these de doctorat, University of California, Los Angeles, 452p

[Avgelis et al, 2005]

**Avgelis A, S. Oxizidis, A. Stylianou and Papadopoulos, A-M (2005)** « Energy consumption and indoor quality relationship in natural ventilated building », in proceeding of urban quality conference, Valencia, Spain- Marsh

[Avril et al, 1992]

- Avril JL, Dabernat H, Denis F, Monteil H(1992)** «Legionela in: ellipses», éditeur Bactériologie clinique.  
[Badescu, 2007]
- Badescu, V. (2007)** «Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house», Renewable energy, Vol 32.  
[Badescu Et Sicre , 2003]
- Badescu, V. Sicre, B. (2003)** «Renewable energy for passive house heating», Energy and Buildings, Vol. 35.  
[Bahadori, 1978]
- Bahadori, MN. 1978** «Passive cooling system in Iranian architecture». Edit Science.  
[BedZed, 2008]
- BedZed.(2008)** «Intelligent building research», a review, Automation in construction. Vol 14,159 p.  
[Bencheikh Hamida, 2007]
- Bencheikh Hamida.(2007)** «etude et realisation d'un systeme de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-evaporative dans les climats chauds et arides», these de Doctorat , Universite Mentouri De Constantine, 2007.  
[Benkert et Heidt,2000a]
- Benkert et Heidt. (2000)** «Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern GAEA mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts»,Luft-/Erdwärme tauscher" der AG Solar NRW, FG Bauphysik and Solarenergie, Universität Siege , 89 p.  
[Benkert et Heidt,2000b]
- Benkert, S. Heid ,TF,D. (2000)** «Abschlussbericht zum Projekt : Validierung des Programms "Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern GAEA», mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärme tauscher"der AG Solar NRW, FG Bauphysik & Solarenergie, Universität Siegen, 89 p  
[Benkert et al,1997]
- Benkert, S., Heidt, F. D., Schöler, D. (1997)** «Calculation tool for earth heat exchangersGAEA», Proceedings of IBPSA Conference. Prague.  
[Bergeron, 1997]
- Bergeron.(1997)** « Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat », Association de climatologie du Québec  
[Bernard,R , 1983]
- Bernard,R .(1983)** « Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications », edition: Lavoisier (2eme ed),256p.  
[Bernier, 2006]
- Bernier. 2006** « Simulation de maisons « zéro-net », Journée thématique SFT-IBPSA. Chambéry, Communication orale.  
[Bobin et Nifenecker, 2005]
- Bobin,J-L. Nifenecker, H .(2005)** « L'énergie de demain : Techniques - environnement – économie », edition:EDP Sciences, 632 p  
[Boivin, 2007]
- Boivin, H. (2007)** « la ventilation naturelle développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale », thèse de Doctorat, faculté d'aménagement, architecture et arts visuels université Laval Québec.  
[Bojić ,2000]
- Bojić, M. (2000)** «Optimization of heating end cooling of a building by employing refuse andrenewable energy, Renewable energy». Vol. 20.  
[BOJIC et al, 1997]
- Bojić, M. Trifunović, N. Papadakis, G. Kyritsis, S. (1997)** «Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building, Energy»,Vol. 22 .  
[Bolund et Hunhammar, 1999]
- Bolund, P. Hunhammar, S. (1999)** : “ Ecosystem services in urban areas”, Ecological Economics, Vol. 29.  
[Boucherf , 2006]

- Boucherf, Djamel . (2006)** «Variabilité et Changement climatique au Sahara», séminaire: Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in arid and hot regions?" Ghardaïa, Algeria, December 2006.  
[Bourgeois, 2004]
- Bourgeois, D. Haghghat, F et Potvin, A. (2004)** :"Making the case for hybrid ventilation and adaptive comfort theory in Canada: conclusions drawn from a literature review". Actes de conférence IAQVEC 2004, the 5th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Toronto.  
[Bourque et Simonet, 2007]
- Bourque, A. Simonet, G. (2007)** « Vivre avec les changements climatiques au Canada », Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., Bush, E., Gouvernement du Canada, Ottawa.  
[Bozonnet, 2006]
- Bozonnet, E. (2006)** « Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti », XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006 - prix jeunes chercheurs, université de la Rochelle  
[Bozonnet, 2005]
- Bozonnet, E. (2005)** « Impacts des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments », Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, France  
[Braganca et al, 2007]
- Braganca, L. Pinheiro, M.D. Jalali, S et Mateus, R. (2007)** «Portugal SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium», edition IOS Press, US.,  
[Brager, et de Dear, 1998]
- Brager, G. S et de Dear, R. (1998)** « Thermal adaptation in the built environment», a literature review, Energy and Buildings.  
[BREEAM, 2008]
- BREEAM. (2008)** « BRE Environmental Assessment Method », disponible sur Site internet. URL : <http://www.breem.org/>  
[Brattebo et Booth, 2003]
- Brattebo, B., Booth, B.D. (2003)**: “ Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems”, Water research, Vol. 37, No.18.  
[BRGM, 2004]
- BRGM. (2004)** « Les Enjeux des Géosciences », collectif BRGM-ADEME , éditions BRGM, ADEME.,  
[CASBEE, 2008]
- CASBEE. (2008)** « CASBEE » disponible sur Site internet. URL <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/overviewE.htm>  
[Brown, 2004]
- Brown, G. Z . Kline, J et Livingston, G. (2004)** «Natural Ventilation in Northwest Buildings», University of Oregon, Eugene, Oregon.  
[Calm, 2002]
- Calm. (2002)** «Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems”, International Journal of Refrigeration (25).  
[Carslaw et Jaeger, 1959]
- Carslaw, H.S et Jaeger, J.C** «Conduction of heat in solids», Clarendon Press. London.  
[CDER, 2002]
- CDER .( 2002)** « Bulletin des énergies renouvelablee » n°2, dec 2002, CDER  
[CDER, 2006]
- CDER. (2006)** « Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation individuelle dans la ville de Batna », communication de Hamouda, C et Malek, A Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 n°3.  
[Chatelet et al, 1998]
- Chatelet, A . Firnandez, P et Lavigne, P. (1998)** «Architecture climatique : une contribution au développement durable , Tome 02 : concept et dispositifs», EDISUD, France, 159p.  
[Chatzidimoula, 2004]

**Chatzidimoula, E.L. (2004)** «contribution of natural ventilation of internal spaces via controlled used of ventilation opening», PHD theses, Aristot University, department of physique ingenering, Thesaniki, Greece.

[Coutte et al, 2008]

**Coutts A,M., Beringer J., Tapper N.(2008)** : «Changing urban climate and CO2 emissions: implications for the development of policies for sustainable citie»s, Urban Policy and Research, In Press

[CSTB et ADEM0 ,2005]

**CSTB et ADEM0 . (2005)** « Guide technique de l'isolation: Performances énergétiques des éléments opaques et transparents », 256p

[Cyr et al, 1998]

**Cyr, J.-F., Marcoux, C., Deutsch, J.C., Lavallée, P. (1998)** : « L'hydrologie urbaine : nouvelles problématiques, nouvelles approches de solutions», Revue des sciences de l'eau, 1998.

[Dahlem, 2000]

**Dahlem, K.H. (2000)** « Der Einfluß des Grundwassers auf den Energie verlust erdreichberührter Bauteile ». Berichte aus Praxis und Forschung des Fachgebietes Bauphysik/TechnischeGebäudeausrüstung/ Baulicher Brandschutz, Universität Kaiserslautern, Austria.

[David et Fabre, 2004]

**David,O. Fabre, A . (2004)** « Les economies d'energie dans l'habitat existant. Une opportunité si difficile a saisir ? », edition: Presses de l'Ecole des Mines de Paris , 252p

[De Brichambaut, 1982]

**De Brichambaut, C-P . (1982)** « Le gisement solaire: évaluation de la ressource énergétique », edition:Tech and Doc./Lavoisier ,Paris,222p.

[De Herde et Liebard, 2002]

**De Herde,A et Liebard,A. ( 2002)** « Guide de l'architecture bioclimatique ,T4, systemes solaires », l'observatoire des énergies renouvelables, France.

[De Paepe et Janssens, 2003]

**De Paepe, M. Janssens, A. (2003)** «Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers»,Energy and Buildings. Vol. 35

[Déoux, 2004]

**Déoux.( 2004)** « guide de l'Habitat Sain », Medieco Editions, 537p .

[Despretz, 2004]

**Despretz,H . (2004)** « Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments. Définitions. Usages. Consommations », revue technique de l'ingénieur, noBE9020, vol 4.

[Dibowski, 2003]

**Dibowski, H. G. (2003)** « Auf Basis umfangreicher Messdatensätze experimentell und numerisch validierte Regeln zur optimierten Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern », Thèse de doctorat.Universität Kassel, Kassel, 225 p.

[Dibowski, 2005a]

**Dibowski, H. G. (2005a)** « Luft-Erdwärmetauscher L-EWT Planungsleitfaden Teil 2: Testanlagenim Verbundprojekt», Rapport AG Solar, Köln. 102 p.

[Dibowski, 2005b]

**Dibowski, H. G. (2005b)** « Luft-Erdwärmetauscher L-EWT Planungsleitfaden Teil 2: Technishe Planung», Rapport AG Solar,Köln, 62 p.

[Eicker, 2001]

**Eicker,U . (2001)** «Solar Technologies for Buildings», edition: John Wiley and Sons Inc , 363p

[Eicker, 2009]

**Eicker,U . (2009)** «Low Energy Cooling for Sustainable Buildings»,edition: Wiley-Blackwell (an imprint of John Wiley & Sons Ltd) ,276 p

[EnEV, 2004]

**EnEV.(2004)** «Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden», Réglementation thermique Allemande. Disponible en ligne. URL : <http://enev-normen.enev-online.de>

[Enright. 2001]

- Enright.(2001)** « Changement d'habitudes, changement climatique », Institut canadien de la santé infantile, Ottawa.  
[Fanger, 1970]
- Fanger, P. O. (1970)** «Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering», McGraw-Hill edition, New York.  
[Fanger,1982]
- Fanger, P.O. (1982)** «Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering», R.E. Krieger Publishing company, Malabar, Florida, 244 p.  
[Feist et al, 2001]
- FEIST, W., PEPER, S., GÖRG, M. (2001)** «Cepheus »,Final Technical Report. 127 p.  
[Fernandez, 1996]
- Fernandez, P. (1996)** « Stratégie d'integration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture », Thèse de Doctorat , école des mines de Paris.  
[Frazer,2005]
- Frazer, L. (2005):** «Paving paradise: the peril of impervious surface», Environmental Health Perspectives, Vol. 113.  
[Gallo et al, 1998]
- Gallo,C .Sala,M . Sayagh,A,A,M.(1998)** « Architecture: comfort and energy», edition Pergamon, 240p.  
[Garimella, 2003]
- Garimella,S .(2003)** «Innovations in energy efficient and environmentally friendly space conditioning systems», Energy (annexe 28).  
[Gauthier et al, 1997]
- Gauthier, C. Lacroix, M. Bernier, H. (1997)** «Numerical simulation of soil heat exchanger storage systems for greenhouses», Solar energy. Vol. 60 .  
[Geitmann,2007]
- Geitmann,G .(2007)** « Énergies renouvelables et Carburants alternatifs »,editon:Hydrogeit , 164p.  
[Gerber, 2008]
- Gerber, P. (2008)** « perspectives psychologiques de la surchauffe estivale », Résultats d'un questionnaire d'enquête d'entretiens qualitatifs et d'un focus groupe, Centre de recherche en psychologie de la santé (CerPsa), Université de Lausanne.  
[Ghaemmaghami, et Mahmoudi, 2005]
- Ghaemmaghami, P, S, Mahmoudi, M. (2005)** «Wind tower a natural cooling system in Iranian traditional architecture», Scientific American edition. 238p.  
[Gheorghiu et al, 2003]
- Gheorghiu, V. A . Polczyk, R. et Kappeller, C. (2003)** «The Warmth Suggestibility Scale - a procedure for measuring the influence of suggestion on warmth sensations», Personality and Individual Differences handbook.  
[Ghiaus et al , 2000]
- Ghiaus.C. Belarbi, R.et Allard.F. (2000)** «Urban context», Activity report altener/solvent, April 2000.  
[Ghosal et Tiwari ,2006]
- GHOSAL,M. D,TIWARI,G. N. (2006)**«Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse»,Energy conversion and management, Vol47.  
[Gicquel, 2009]
- Gicquel,R .(2009)** « Systèmes énergétiques : Volume 2, Applications » , edition:Presses de l'Ecole des mines 349p.  
[GIEC, 2007]
- GIEC. (2007)** « 4 eme rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ».  
[Givoni, 1978]
- Givoni,B .(1978)** «Man, Climate and Architecture», Edition le Moniteur,499 p  
[Givoni, 1994]
- Givoni,B. (1994)** «Passive and Low Energy Cooling of Buildings»,edition: John Wiley and Sons Inc 272p.

[Givoni, 1997]

**Givoni,B.(1997)** «Passive and low energy cooling of building », edition:John Wiley and Sons Inc ,

[Givoni, 1998]

**Givoni,B.(1998)** «Climate Considerations in Building and Urban Design», edition:John Wiley and Sons Inc , Van Nostrand Reinhold,480p.

[Goetzberger et al, 1993]

**Goetzberger, A. Bopp, G. Griesshaber, W. Stahl, W. (1993)** «The PV/hydrogen/oxygensystem of the self-sufficient solar house Freiburg», Conference record of the twenty third IEEE photovoltaic specialists conference, Louisville.

[Goetzberger et al, 1994]

**Goetzberger, A. Stahl, W. Bopp, G. Heinzl, A. Voss, K. (1994)** «The self-sufficient solar house Freiburg. Advances in Solar Energy», Vol 9.

[Granados, 1997]

**Granados,C.(1997)** «Solar Cooling in Spain – Present and Future», Workshop For schungsverbund Sonnen energie.

[Guimont,2002]

**Guimont.2002:** "Méthode d'évaluation de la climatisation passive par l'usage de la masse thermique et de la ventilation nocturne dans les immeubles administratifs au Québec»,Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.

[Hadorn, 2004]

**Hadorn, J.C.(2004)** « chaleur et stockage de chaleur », Rapports de synthèse du programme de recherche suisse Solaire actif , Office fédéral l'énergie OFEN (Suisse).

[Hardy et al, 2001]

**Hardy, J.E.,Mitlin, D. Satterthwaite, D. (2001)** «Environmental problems in an urbanizing world», Earthscan Publishers, London, 2001.

[Hawkes, 1982]

**Hawkes. (1982)** «The Theoretical Basis of Comfort in the 'Selective' Control of Environments», Energy and Buildings.

[Herzog, 2007]

**Herzog, B. (2007)** « Le puits canadien », Eyrolles Environnement,116p.

[Herzog, 2004]

**Herzog,B . (2004)** « La maison écologique », Revue bimestriel n°22, août-septembre .

[Hetzl et al, 2007]

**Hetzl,J . Kyvelou,S . Sinou,M . Iwamura,K.(2007)** « L'application du développement durable au cadre bâti dans l'espace Méditerranéen : La démarche » ,edition:Presses Universitaires de Limoges et du Limousin ,120p.

[Hollmuller, 2002]

**Hollmuller,P . ( 2002)** « Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments :Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique » , Thèse de Doctorat, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

[Hollmuller et al, 2005]

**Hollmuller,P . Lachal,B et Pahud, D .(2005)** « Rafraîchissement par geocooling : Bases pour un manuel de dimensionnement », CUEPE n° 2 Rapports de recherche du CUEPE n° 5, Office Fédéral de l'Energie .Université della Svizzera Italie.

[Hollmuller et Lachal, 2001]

**Hollmuller,P. Lachal,B. (2001)** «Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring,simulation and economic aspects», Energy and Buildings. Vol. 33 .

[Humphreys, 1981]

**Humphreys. M-A . (1981)** «The dependence of comfortable temperatures upon indoor and outdoor temperatures» ,Cena and Clarke (Eds.), Bioengineering, Physiology and Comfort, Amsterdam, Elsevier.

[Huteau, 1995]

**Huteau,M . (1995)** « Manuel de psychologie différentielle », edition: Dunod, Paris

[Hyde, 2008]

**Hyde, R . (2008)**«Bioclimatic Housing: Innovative Designs for Warmer Climates» ,Earthscan ,400p.

[Hyde, 2008]

**Hyde, R . (2000)** «Climate Responsive Design: A Study of Buildings in Moderate and Hot Humid Climates», édition: Spon Press, 256p.

[IEA, 2002]

**IEA. (2002)** «Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings», Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS), annexe 35.

[IEA, 2008]

**IEA.(2008)** «Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings», IEA Information paper, OECD/IEA, March 2008.

[IFEP,2007]

**IFEP. (2007)** « quelles technologies face aux défis énergétiques du nouveau siècle», Revue n° 48 et 49 du 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> trimestre 2000, Institut d'énergie et de l'environnement de la Francophonie

[Incropera et De Witt, 1990]

**Incropera, F et De Witt, D.1990** «Fundamentals of heat and mass transfer, Third Edition, John Wiley & Sons.

[Ineichen, 2006]

**Ineichen,P.(2006)** « Données climatiques estivales dans la région genevoise : valeurs moyennes et extrêmes »,Rapports de recherche du CUEPE n° 7,Service Cantonal de l'Energie de Genève et del'Office Fédéral de l'Energie.

[INSA, 2004]

**INSA de Toulouse. KUNETZ ,J. LEFEBVRE,L .(2004)** « Les puits provençaux, etude et méthode de dimensionnement », Rapport de projet tutoré de 5<sup>ème</sup> année. Janvier 2004. 54 p

[ISO, 1993]

**ISO .7730. (1993)** «Moderate thermal environment determination of the PMV and the PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort », International ISO 7730, Brussels, Belgium.

[Izard et Guyot1979]

**Izard,J-L et Guyot,A (1979)** «Archi bio», édition Parenthèses ,131p.

[Izard, 1979]

**Izard,J-L. (1994)** «Architectures d'été construire :pour le confort d'été»,édition Edisud, 141p.

[Jacovides et al, 1996]

**Jacovides, C.P., Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J.O. (1996)** «On the round temperature profil for passive cooling applications in buildings». Solar energy. Vol. 57, No 3.

[Hadorn, 2005]

**Hadorn,J-C . (2005)** «Thermal energy storage for solar and low energy buildings», édition University of Lleida, 170p

[Jones, 1992]

**Jones, B.G. (1992)** «Population growth, urbanization and disaster risk and vulnerability in metropolitan areas : A conceptual framework». In Kreimer A. and Mohan Munasinghe (Eds.) Environmental Management and Urban Vulnerability, World Bank Discussion Paper, n° 168.

[JORA , 1999]

Journal officiel de la république Algérienne n° 51du 02/08/1999,

[JORA , 2004a]

Journal officiel de la république Algérienne N° 32 du 23/05/2004

[JORA , 2004b]

Journal officiel de la république Algérienne N° 52du 18/08/2004.

[JORA , 2009]

journal officiel de la république Algérienne N° 12du 12/02/2009.

[JORF , 2006]

Journal Officiel de la République Française no 121 du 25 mai 2006 portant Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles des bâtiments.

[JORF, 2007]

Journal Officiel de la République Française no 112 du 15 mai 2007 portant Arrêté du 8 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique ».

[Kantola et al, 1984]

- Kantola, Syme et Campbell .(1984)** « Cognitive dissonance and energy conservation », Journal of Applied Psychology.  
[Kasbadji, 2006]
- Kasbadji Merzouk, N. (2006)** « évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », these de doctorat,l'universite Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 124p.  
[Kemajou, 2006]
- Kemajou, A. (2006)** « puits camerounais en climat tropical humide », Communication privée de l'auteur concernant une étude théorique et expérimentale, ENSET de Douala.  
[Kempf, 2005]
- Kempf, H. du 05 mars 2005:** "Kyoto an 1, monde.fr", Edition spéciale.  
[Klimahaus, 2008]
- Klimahaus.(2008)** « Klimahaus/Casaclima », disponible sur site Internet :  
<http://www.klimahausagentur.it/>  
[Kunetz et Lefebvre, 2001]
- Kunetz, J. Lefebvre, L. (2001)** « Les puits provençaux. Etude et méthode de dimensionnement », Rapport de projet tutoré de 5ème année. INSA de Toulouse, 54 p.  
[L.M.D, 2005]  
Rapport du C.N.R.S. et Secrétaire du Programme mondial de recherche sur le climat  
[Labs,1989]
- Labs, K. (1989)** «Earth Coupling for passive Cooling», Cambridge Massachusetts, The MIT Press.  
[Lachal *et al*, 2004]
- Lachal , B. Soutter, C. Weber, W. (2004) « Il est possible de garantir le confort d'été sans recourir à la climatisation », La revue durable, N° 09, février-mars.  
[Lachal , 2008]
- Lachal,B.( 2008):** "Geocooling Réponse thermique des bâtiments et intégration des techniques de rafraîchissement passif", Pôle en sciences de l'environnement et Energie, Université de Genève.  
[Lavigne et al, 1994]
- Lavigne,P.Brejon,P et Fernandez,P . (1994)** « Architecture climatique : Une contribution au développement durable, tome 1 : Bases physiques », edition Edisud , 190p  
[Lester et al, 1987]
- Lester L. Boyer, Walter T. Grondzik, (1987)** : "Earth Shelter Technology" ,Texas A & M University Press, 144p  
[Liebard et De Herde, 2005]
- Liebard,A et De Herde,A .(2005)** « Traité de l'architecture et de l'urbanisme bioclimatique : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable », Edition Observ'ER , Paris,778p.  
[Luber et McGeehin,2008]
- Luber, G., McGeehin, M. (2008)** : “ Climate change and extreme heat events ” , American Journal of Preventive Medicine, Vol. 35.  
[MAD, 1999]
- MAD. 1999** « L'Outil Froid », revue N°10, Avril 1999.  
[Magali, 2002]
- Magali, B . (2002)** « création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physique, économique et thermique », thèse de Doctorat, faculté science appliquées, unité d'architecture, Université Catholique de Louvain..  
[Mailhot et Duchesne, 2005]
- Mailhot, A. Duchesne, S. (2005)** : « Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain », VertigO, Hors-série no. 1.  
[Matarass, 2005]
- Matarass, P . (2005)** « bâtiment et effet de serre .le chantier de l'isolation dans les bâtiments existants », Rapport d'atelier de changement climatique, ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES de Paris.  
[Maugard et al, 2005]
- Maugard, A. Millet, J.-R. Quenard, D. (2005):** "Vers des bâtiments à énergie positive". Présentation du CSTB.

[MDDEP, 2006]

**Ministère du développement durable et des parcs (MDDEP) (2006)** « Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2003 et évolution depuis 1990 »

[MEAT,1998]

**MEAT.(1998)** « Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques »,Rapport ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire, 1998

[MEM, 2007]

**MEM. (2007)** « Guide des énergies renouvelable », Bulletin de Ministère de l'énergie et des Mines, , édition 2007, 89p.

[Mermoud, 2001]

**Mermoud,A .( 2001)** « Cours de physique du sol », Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

[Mezred, 1997]

**Mezred,M .(1997)** « une approche du zonage climatique de l'Algérie pour l'étude du comportement thermique des constructions », actes des journées nationales sur les applications des énergies solaires, Université de Batna, 10 et 11 mai 1997.

[Mihalakakou et al, 1992]

**Mihalakakou, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. (1992)** «Modelling the earth temperature using multiyear measurements ». Journal of Energy and Buildings.

[Mihalakakou et al, 1994]

**Mihalakakou. G, Santamouris.M, Asimakopoulos.D. (1994)** «Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers», Solar energy revue.

[Mihalakakou et al, 1995]

**Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D. (1995)**«Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers», Solar energy rvue.

[Minergie, 2008 ]

**Minergie . (2008).** Site Internet. URL : <http://www.minergie.ch>

[Moore S and T, 1995]

**Moore S. And T . (1995)** « Under the sun - Desert style and architecture », a Bulfich Press Book Little Brown ed.Company.

[Morillon, 2005]

**Morillon,R . (2005)** « L'intégration de l'efficacité énergétique et du développement urbain durable dans de faisabilité », Thèse de master en Génie urbain, Université Marne la vallée.

[MUH, 1993]

**MUH . (1993):** "Recommandations architecturales" , Bulletin Ministère de l'Habitat, ENAG/Editions, 1993

[MUH, 2008]

**MUH . (2008)** « La revue de l'habitat » , revue d'information du ministère de l'habitat et de l'urbanisme N° 02-Novembre 2008, Alger, 74p.

[MUH, 2009]

**MUH . (2009)** « La revue de l'habitat » , revue d'information du ministère de l'habitat et de l'urbanisme N° 03-Mars 2009, Alger, 74p.

[Musy et Soutter, 1993]

**Musy,A. Soutter. M.(1991)** «Physique du sol» ,Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR,collection Gérer l'environnement,335p.

[Nicol, 1981]

**Nicol, F. (1981)** «Thermal Comfort: a handbook of field studies toward an adaptativemodel», School of Architecture, University of East London.

[Nicol and al, 1993]

**Nicol, F. Jamy, Skyes. Humphreys . Roaf et Handcock . (1993)** «A survey of thermal comfort in Pakistan: toward new indoor temperature standards», School of Architecture, Oxford Brookes University.

[OCDE, 1999]

**OCDE. (1999)** «Energie : Les Cinquante Prochaines Années», Rapport de l'Organization for Economic Cooperation and Development (OECD).

- [Oke, 1982]  
**Oke, T.R. (1982)** «The energetic basis of an urban heat island», J. Roy. Meteor. Soc.  
 [Oke, 1987]  
**Oke, T.R. (1987)** «Boundary layer climates», 2nd ed., Routedledge, London, 474 p.  
 [Oke and al, 1991]  
**Oke T.R, G.T. Johnson, D.G. Steyn and I.D. Watson. (1991)** «Simulation of Surface Urban Heat Islands under 'Ideal' Conditions at Night - Part 2 : Diagnosis and Causation», Boundary Layer Meteorology.  
 [Olgyay, 1963]  
**Olgyay, V. (1963)** «Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism», dition : John Wiley & Sons Inc ,208p  
 [ONM, 2009]  
**ONM. (2009)** « données météorologiques pour la ville de Tizi Ouzou ».  
 [ONS, 2009]  
**ONS. (2009)** « 5eme recensement général de la population et l'habitat », bulletin de l'office national des statistique n° 35 juillet 2009, Alger.  
 [Ouali., 2006]  
**Ouali . (2006)** « Etude Géothermique du Sud de l'Algérie », Mémoire de Magister en Géophysique, Université de Boumerdès.  
 [Ould-Henia, 2003]  
**Ould-Henia, A. (2003)** « choix climatiques et construction zones arides et semi arides la maison a cour de bou saada », thèse de doctorat, école polytechnique Federale de Lausanne, 181p.  
 [Paschauri et Reisinger, 2007]  
**Paschauri, R.K., Reisinger, A. (2007)** : [ Bilan 2007 des changement des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC], Genève, 1997.  
 [Pahud, 2002]  
**Pahud, D. 2002** « Ground heat storage », , laboratoire du LEEE, ,INES magazine, Stockage saisonnier dans le sol , SUPSI.  
 [Pallack et Cummings , 1976]  
**Pallack et Cummings . (1976)** «Commitment and voluntary energy conservation», Personality and Social Psychology Bulletin.  
 [Parriaux et Arnould, 2006]  
**Parriaux, A et Arnould, M. (2006)** « Géologie : Bases pour l'ingénieur » , edition PPUR ,514p.  
 [Passivhaus, 2008]  
**Passivhaus. (2008)** , report of Passivhaus Institut . Site Internet ; URL : <http://www.passiv.de>  
 [POS, 2006]  
**POS. (2006)** « rapport de deuxième phase POS de tizi Ouzou », DUC tizi Ouzou  
 [Powell, 2005]  
**Powell, J . (2005)** « Puits Canadien ou Provinçal: principes et étude de cas », Mémoire de fin de formation "HQE haute qualité environnementale, Ecole d'architecture de Lyon.  
 [R2000, 2005]  
**R2000. (2005)** « norme R-2000. Ressources naturelles Canada », Disponible en ligne. URL: <http://oee.nrcan.gc.ca/residentiel/personnel/maisons-neuves/r-2000/standard/derniere-version/r-2000-norme-avril-2005.pdf>.  
 [Raoul, 2007]  
**Raoul, M. (2007)** « Histoire du chauffage urbain », L'Harmattan edition, 360p  
 [Rezig, 1991]  
**Rezig, M. (1991)** « Etude Géothermique du Nord-Est de l'Algérie », these DEA, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, Montpellier  
 [Rezig, 1992]  
**Rezig, M. (1992)** « Etude Géothermique de l'Extrémité Est de l'Atlas Saharien », Rapport Interne, CDER, 1992.  
 [RICAUD, 2007]

- RICAUD, A. (2007)** « La maison ZEN », Dossier de présentation. Cythelia SARL, Chambéry.  
[Rotter et Hochreich, 1975]
- Rotter, J. B . Hochreich, D. J. (1975)** « Personality ». Edition: Scott Foresman, Dallas.  
[Roulet, (2004)]
- Roulet, C-A. (2004)**: « Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments », édition PPUR ,  
358p  
[RPF, 2001]
- RPF. (2001)** « Revue Pratique du Froid », N°894, juin 2001, France.  
[Rushton, 2001]
- Rushton, B. T. (2001)** : « Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads »,  
J. Water Resour. Plng. and Mgmt, Vol. 127, No. 3.  
[Salomon et Aubert, 2004]
- Salomon, T et Aubert, C. (2004)** « Fraîcheur sans clim : Le guide des alternatives écologiques », édition  
Terre vivante l'écologie pratique, 160p.  
[Salomon et Bedel, 1999]
- Salomon, T et Bedel, S. (1999)** « La maison des [néga]watts Le guide malin de l'énergie chez soi »,  
édition earth scan, 1999, 150p.  
[Santamouris, 2003]
- Santamouris, M. (2003)** « Solar Thermal Technologies for Buildings », édition: Earthscan Ltd, 256p  
[Santamouris, 2005]
- Santamouris, M. (2005)** « passive cooling of buildings », Published in 'Advances of Solar Energy',  
2005, ISES, James and James Science Publishers, London, 40p.  
[Santamouris, 2009]
- Santamouris, M. (2009)** « Advances in Building Energy Research », Earthscan Ltd, 264p  
[Santamouris et Asimakopoulos, 1996]
- Santamouris, M. Asimakopoulos, D. (1996)** « Passive Cooling of Buildings », James and James Ltd ,  
484p.  
[Santamouris et al, 2001]
- Santamouris, M. Demosthenes et Asimakopoulos, N. (2001)** « Energy and Climate in the Urban Built  
Environment », James and James edition Ltd , 412p.  
[Santamouris et Adnot, 2004]
- Santamouris, M et Adnot, J. (2004)** « Cooling the Cities : Rafrâichir les villes : Energy Efficient  
Cooling Systems and Techniques for Urban Buildings », édition: Presses de l'Ecole des Mines (2  
décembre 2004), 263p  
[Sarlos et al, 2003]
- Sarlos, G. Haldi, P-A. Verstraete, P. (2003)** « Traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de  
Lausanne, volume 21 : Systèmes énergétiques », édition: Presses Polytechniques et Universitaires  
Romandes (PPUR), 871p.  
[Seligman et Darley, 1977]
- Seligman C. Darley, J.M. (1977)** « Feedback as a means of decreasing residential energy  
consumption », Journal of Applied Psychology.  
[Sénit, 2008]
- Sénit, C-A. (2008)** « L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel : une analyse des politiques des  
pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée », Sciences Po, Iddri n°14, Institut du développement durable  
et des relations internationales  
[Serres et al, 1997]
- Serres, L. Trombe, A. Conilh, J. H. (1997)** « Study of coupled energy saving systems sensitivity  
factor analysis », Building and Environment. Vol. 32.  
[Suisse énergie, 2003]
- Suisse énergie. (2003)** « l'utilisation de la chaleur terrestre Aperçu, technologies », édition : Office  
fédéral de l'énergie (OFEN), disponible sur le site internet <http://www.bbl.admin.ch/bundespublikationen>  
[Suisse énergie, 2005]
- Suisse énergie. (2005)** « La Chaleur de la Terre : Une énergie propre et durable pour tous », revue Infos  
- Géothermie - n° 10 - Octobre 2005

[Thiers, 2008]

**Thiers, S. (2008)** « bilans énergétiques et environnementaux bâtiments à énergie positive », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris.

[Torrenti et Gilles, 1988]

**Torrenti, R et Gilles, R. (1988)** « Habitats Climatiques », programme Rexcoop, SIGMA consultants, France, 1988.

[Trombé et al, 1993]

**Trombé, A .Bourret. INSAde Toulouse P. (1993)** « Puits Provençal », Ademe – Frme, Experimentation Del'insa1993

[Trombé, 2005]

**Trombé, A. (2005)** « Dimensionnement du « puits climatique » Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux », Rapport final PREBAT ADEME Région Languedoc-Roussillon.

[Trombé et INSA, 2003]

**TROMBE.A,INSA de Toulouse .(1993)** « Rafrâichissement d'air par puits provençal », expérimentation de l'Ariège

[Trombé et INSA, 2004]

**TROMBE,A et INSA de Toulouse.(1991)** « Rafrâichissement d'air par puits provençal »,expérimentation de Castanet.

[TZAFERIS et al, 1992]

**TZAFERIS, A., LIPARAKIS, D., SANTAMOURIS, M., ARGIRIOU, A. (1992)** : "Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers", Energy and buildings. Vol 8 (1).

[USGBC, 2008]

**USGBC 2008:** "U.S. Green Building Council", disponible sur Site Internet. URL :<http://www.usgbc.org/>

[USEPA, 2008]

**United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2008)** «Ground-level ozone: health and environment». USEPA. Accessible au : <http://www.epa.gov/air/ozonepollution/health.html>.

[Virgone et al, 2006]

**Virgone,J . Fabrizio,E. RaffeneI,Y . Blanco,E . Gérard Thomas, G . (2006)** « efficacité énergétique des batiments » journée thématique sft – ibpsa , institut national d'énergie solaire mardi 21 mars 2006

[Voogt, 2002]

**Voogt, J.A. . (2002)** «Urban heat island», Encyclopedia of global environmental change, Vol. 3

[Wärme schutzverordnung,1995]

**Wärme schutzverordnung 1995** «Bundesgesetzblatt vom 16». BGBl.

[WHOQOL Group, 1993]

**WHOQOL Group. (1993)** «Study protocol for the World Health Organisation project to develop a quality of life assessment instrument», Quality of Life Research,OMS

[Wiesenfeld, 2006]

**Wiesenfeld,B.(2006)** « L'énergie en 2050: Nouveaux défis et faux espoirs » ,EDP Sciences , 221p

[Williams et Gold, 1977]

**WILLIAMS, G. P., GOLD, L. W. (1977)** « Les températures de sol ». Digeste de la construction au Canada. Institut de recherche en Construction. Centre national de recherche Canada

[Winnett et coll , 1978]

**Winnett et coll .1978** «Effects of monetary rebates, feedback, and information on residential electricity conservation», Journal of Applied Psychology.

[Wittwer et Voss, 2001]

**Wittwer, V. Voss, K. (2001)** «Solar Passiv-haus „Wohnen und Arbeiten», Rapport n° TOS-1-0103- VK-02. Fraunhofer ISE. Freiburg-im-Bresgau. 46 p.

[Zimmermann, 1999]

**Zimmermann,M.(1999)** «Handbuch der passiven Kühlung», EMPA ZEN, Dübendorf, Switzerland.

[Zweifel, 2004]

**Zweifel, G. (2004)** « A simplified model of a Ground to Air Heat Exchanger», Hochschule für Technik+Architektur Luzern (HTA Luzern). Horw.

**Annexe 01****Tableau de Mahoney pour la ville de Tizi Ouzou****Tableau 01 :****Température de l'air °C :**

	Jan.	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	V max	AMT
Moy men max	15.2	16.9	19.9	21.9	26	32.3	35.4	36.1	31.2	27	19.8	16.1	36.1	24.9
Moy men min	06.9	07.0	08.6	10.0	14.2	18.6	21.3	22.6	19.0	15.3	10.7	7.7	06.9	14.6
L'écart mens	8.3	10.5	11.5	11.7	12.2	12.7	14.2	13.4	12.1	12.0	09.2	08.4	V min	AMR

**Humidité relative :**

	Jan.	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Moy men max	93.38	93.5	90.8	90.5	88.9	80.8	76.0	77.3	81.9	88.7	91.0	93.3
Moy men min	58.8	54.0	47.2	45.5	45.4	33.7	30.7	31.0	40.8	43.8	53.0	59.3
Moyenne mensuelle	76,09	73,75	69	68	67,15	57,25	53,35	54,15	61,35	66.25	72	76.3
Groupe d'humidité	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4

1 < 30%
2 : 30N50%
3 : 50N70%
4 > 70%

**Précipitation et vents :**

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Précipitation (mm)	141.7	74.6	52.0	72.5	92.6	04.9	01.6	08.0	37.8	53.4	102.9	140.3
Intensité des vents m/s	1.34	1.35	1.5	1.47	1.9	2.21	2.15	2.06	1.53	1.18	1.48	2.62
Direction des vents	O	O	O	O	O	ONO	ONO	ONO	O	O	ONO	O

**Tableau 02 : Diagnostic °C**

	Jan.	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec	AMT
Moy men max	15.2	16.9	19.9	21.9	26	32.3	35.4	36.1	31.2	27	19.8	16.1	24.9
Confort du jour le plus élevé	27	27	29	29	29	29	29	29	29	29	27	27	
Confort du jour le plus bas	22	22	23	23	23	23	23	23	23	23	22	22	
Stress du jour	C	C	C	C	O	H	H	H	H	O	C	C	
moy men min	6.7	6.7	8.5	10.2	14.2	18.6	21.4	22.2	18.9	15.2	10.7	7.8	
Confort de nuit le plus élevée	21	21	23	23	23	23	23	23	23	23	21	21	
Confort de jour le plus bas	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
Stress de nuit	C	C	C	C	C	O	O	O	O	C	C	C	

H = Chaud  
O = confort  
C = froid

Limite de confort Groupe d'humidité	AMT > 20°C				AMT 15N20°C				AMT < 15 °C			
	Jour		Nuit		Jour		Nuit		Jour		Nuit	
	Basse	Elevée	Basse	Elevée	Basse	Elevée	Basse	Elevée	Basse	Elevée	Basse	Elevée
1	26	34	17	25	23	32	14	23	21	30	12	21
2	25	31	17	24	22	30	14	22	20	27	12	20
3	23	29	17	23	21	28	14	21	19	26	12	19
4	22	27	17	21	20	25	14	20	18	24	12	18

**Signification :**

	Indicateur	Stress thermique		Précipitation	Groupe d'humidité	Ecart mensuel
		Jour	Nuit			
Mouvement d'air essentiel	H1	H			4	
		H			2N3	<10 °C
Mouvement d'air désirable	H2				4	
Protection contre les pluies	H3			>200mm		
Capacité thermique	A1				1N3	>10 °C
Dormir à l'extérieur	A2		H		1N2	
		H	O		1N2	>10 °C
Protection contre le froid	A3	C				

**Indicateurs :**

	Jan.	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
H1													00
H2													00
H3													08
A1			+	+	+	+	+	+	+	+			00
A2													00
A3	+	+	+	+							+	+	06

**Tableau 03 : Les recommandations spécifiques:**

Indicateur total					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
			08		06

**La disposition :**

		0-10											
		11.12			5-12	+	1	Orientation nord-sud (long de l'axe est-ouest)					
			0-4										

**L'espace :**

11.12							3	Espacement ouvert pour la pénétration des brises marine
2-10							4	Protection contre les vents froids et chauds
0-1						+	5	Disposition compacte des propriétés

**Les mouvements d'air :**

3-12							6	<i>Simple vitrage, prévision permanentes pour les mouvements d'air</i>
1-2			0-5					
			6-12				7	<i>Double vitrage, prévision temporaire pour les mouvements d'air</i>
0	2-12							
	0-1					+	8	<i>Les mouvements d'air ne sont pas recommandés</i>

**Les ouvertures :**

			0-1		0		9	<i>Larges ouvertures, 40 – 80 %</i>
			11.12		0.1		10	<i>Petites ouvertures, 10 -20 %</i>
<i>Autres conditions</i>						+	11	<i>Moyenne ouvertures, 20 -40 %</i>

**Les murs :**

			0-2				12	<i>Murs légers, faible inertie thermique</i>
			3-12			+	13	<i>Murs extérieurs et intérieurs massives</i>

<i>Indicateur total</i>					
<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
			08		06

**Les toitures :**

			0-5				14	<i>Toitures légères avec isolation</i>
			6-12			+	15	<i>Toitures lourdes</i>

**Dormir à l'extérieur :**

				2-12			16	<i>Espace pour dormir à l'extérieur recommandé</i>
--	--	--	--	------	--	--	----	--

**Protection contre les pluies :**

		3-12					17	<i>Protection contre les pluies abondantes nécessaire</i>
--	--	------	--	--	--	--	----	---

**Tableau 04 : Détails recommandations**

<i>Indicateur total</i>					
<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
			08		06

**Dimensions des ouvertures :**

			0-1		0	1	<i>Large : 40 - 80 %</i>
					1-12	2	<i>Moyennes : 25 -40 %</i>
			2-5				
			6-10			+	3 <i>Petites : 15 - 25 %</i>
					0-3	4	<i>Très petites : 10 – 20 %</i>
			11.12		4-12	5	<i>Moyenne : 25 – 40 %</i>

**Position des ouvertures :**

3-12						6	<i>Au Nord et au Sud.</i>
			0-5				
1-2			6-12			7	<i>Les murs internes et les ouvertures au dessus de ceux –ci.</i>
0	2-12						
<i>Indicateur total</i>							
<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>		
			08		06		

**Protection des ouvertures :**

				0-2		8	<i>Exclure les apports directs</i>
		2-12				9	

**Murs et planchers :**

			0-2			10	<i>Léger à faible capacité thermique</i>
			3-12			+	11 <i>Lourds avec un déphasage de 8 h</i>

**Toitures :**

10.12		0-2				12	<i>Légers</i>
		3-12				13	<i>Légère, isolée</i>
0-9		0-5					
		6-12			+	14	<i>Lourde avec un déphasage de 8h</i>

## Annexe 02 : programme Scilab

**Code**

```
//T0// programme puit provençal
// *****
//
//          PREAMBULE
// *****
// On efface tout et on élargit le mémoire
clear;
stacksize(10000000);
// On fixe le repertoire de travail
ROOT   = 'C:\Users\hp\Desktop\puit provençal\';
// On fixe le nom de base des fichiers
NOMDEBASE = 'cea';
//
// Appel de fonctions
//
// On ouvre un fichier d'information
//INFO = ROOT+NOMDEBASE+'.inf';
//File = file('open',INFO,'unknown');
format1 = '%5s %6.3f %6.3f';
format2 = '%4i %6.3f ';
format3 = '-----\n';

//*****

S =input("Surface[m2]=");
H =input("Hauteur[m]=");
e=0.006;
di=0.188;
de=0.2;
Si=(%pi*di^2)/4;//(m2)
lamda=0.16;
vol=S*H;
tauxrenouv=0.5;
qv=vol*tauxrenouv/3600;//(m3/s)
v=qv/Si;//(m/s)
Rcond=e/(lamda*%pi*de);//(m.K/W)
```

```

h=5.55*v^(0.8);
Rconv=1/(h*pi*di); //(m.K/W)
Rtot=Rcond+Rconv; //(m.K/W)
Te=input("Temperature Ext[C]=");
Tsol=input("Temperature Sol[C]=");
Tsouhaite=input("Temperature Sohaite interier de la maison[C]=");
deltaTmoy=((Te-Tsol)-(Tsouhaite-Tsol))/(log((Te-Tsol)/(Tsouhaite-Tsol)));
deltaTair=deltaTmoy+Tsol;
ro=1.2; //(Kg/m3)
Cp=1004;
L=(Rtot*ro*Cp*qv*(Te-Tsouhaite))/(deltaTair-Tsol)
deltaL=1;
Tas1(1)=Te;
for i=1:L*10
    Flux(i)=(2*Rtot*ro*Cp*qv*pi*de*deltaL*(Tas1(i)-
Tsol))/((2*Rtot*ro*Cp*qv+2*pi*de*deltaL)*Rtot);
    Tas1(i+1)=Tas1(i)-(Flux(i)/(ro*Cp*qv));
end
xset("window",1)
plot(Tas1)
xtitle("Evolution de la Temperature ", "Longeur (m)", " T (°C)")
Console : ici après avoir tapé le programme celle- ci nous demande d'entrer les donnée puis cela
permet de calculer la longueur et donne le graphe
Surface[m2]=192
Hauteur[m]=3.06
Temperature Ext[C]=35
Temperature Sol[C]=17
Temperature Sohaite interier de la maison[C]=21
L =39.538689

```