

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière
Département de Physique



N° d'Ordre :
N° de série :

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

Filière : Physique
Spécialité : Physique énergétique

Présentée par :

Belkhir HEBBAL

THÈME

Optimisation de la consommation énergétique d'un habitat saharien par des techniques passives

Soutenu publiquement le : 02/02/2022

Devant le jury composé de :

Mr. Nouredine SETTOU	Professeur	Univ. Ouargla	Président
Mme. Oum El Kheir BABA HANI	Professeur	Univ. Ouargla	Examinateur
Mr. Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE	Directeur de recherche	URAER Ghardaïa	Examinateur
Mr. Mohammed El Hadi ATTIA	Maitre de conférences A	Univ. El Oued	Examinateur
Mr. Yacine MARIF	Maitre de conférences A	Univ. Ouargla	Directeur de thèse
Mr. Mohammed Mustapha BELHADJ	Maitre de conférences A	Univ. Ouargla	Co-Directeur de thèse

Année universitaire : 2021/2022

Dédicace

A

Mes chers parents

Ma Grande et ma petite famille

Mes Proches et Mes Amis

Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé

Ce Modeste travail est pour vous

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Je tiens à remercier sincèrement, et exprimer ma profonde reconnaissance et mon grande estime à mon Directeur de thèse Docteur **Yacine MARIF**, qui s'est toujours montré à l'écoute et a été très disponible tout au long de la réalisation de cette thèse malgré ses charges académiques, ainsi que pour, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Je remercie particulièrement mon Co-Directeur de thèse le Docteur **Mohammed Mustapha BELHADJ** de m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **Noureddine SETTOU**, Professeur à l'université KASDI Merbah Ouargla, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Je tiens également à remercier mes examinateurs Madame **Oum El Kheir BABA HANI**, Professeur à l'université KASDI Merbah Ouargla, Monsieur **Sidi Mohammed El-Amine BEKKOUCHE** Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa et Monsieur **Mohammed El Hadi ATTIA**, Maître de conférences A à l'université Hamma Lakhdar El Oued, qui ont accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je remercie vivement Professeur **Maamar HAMDANI**, Maître de recherche à l'URAER Ghardaia pour m'avoir aidé sur la partie simulation et de m'avoir consacré autant de temps.

Je présente mes remerciements au Professeur **Lazhar BENMABROUK** (Université d'Ouargla) de m'avoir aidé et encouragé tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également les membres du laboratoire LENREZA (Université KASDI Merbah Ouargla) pour leurs aides et leurs encouragements.

Je tiens à remercier vivement mon ami **Omar OUIROU HADJ YAHIA** d'avoir eu l'amabilité de mettre à ma disposition sa maison durant toute la période expérimentale. Je remercie aussi mon cher ami **Hichem SID ROUHOU** pour m'avoir aidé sur la partie programmation et montage des capteurs.

Enfin, je ne manque pas l'occasion pour remercier toutes les personnes qui auront contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.

Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xiii
Nomenclature.....	xiv
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments	
1.1. Introduction.....	7
1.2. Consommation d'énergie dans le contexte mondial et algérien.....	7
1.2.1. Consommation énergétique mondiale.....	8
1.2.1.1. Consommation mondiale par produit.....	8
1.2.1.2. Consommation mondiale par secteur.....	9
1.2.1.3. Production mondiale d'électricité.....	10
1.2.1.4. Capacités mondiales de production d'électricité à base de ressources renouvelables.....	11
1.2.2. Consommation énergétique en Algérie.....	12
1.2.2.1. Consommation nationale par produit.....	12
1.2.2.2. Consommation nationale par secteur.....	13
1.2.2.3. Consommation énergétique dans le secteur résidentiel.....	14
1.3. Efficacité énergétique dans le bâtiment.....	14
1.3.1. Avantages de l'efficacité énergétique.....	14
1.3.2. Réglementation thermique des bâtiments.....	15
1.3.2.1. Réglementation américaine.....	15
1.3.2.2. Réglementation française.....	15
1.3.2.3. Réglementation espagnole.....	16
1.3.2.4. Réglementation tunisienne.....	16
1.3.2.5. Réglementation marocaine.....	16
1.3.2.6. Réglementation algérienne.....	16
1.3.3. Programme national de maîtrise de l'énergie.....	17
1.3.4. Programme Eco-Bât.....	18
1.3.5. Programme National de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNEREE).....	19
1.3.6. Classification des bâtiments à efficacité énergétique.....	21
1.3.6.1. Bâtiments zéro-énergie (BZE).....	21
1.3.6.2. Bâtiments à énergie positive (BEPOS).....	21
1.3.6.3. Bâtiments à basse consommation (BBC).....	21

1.3.7. Certification énergétique des bâtiments (Labels).....	22
1.3.7.1. Label Passivhaus	22
1.3.7.2. Label HQE.....	23
1.3.7.3. Label LEED.....	24
1.3.7.4. Label BREEAM	25
1.3.7.5. BCA Green Mark	25
1.3.7.6. Label BBC-Effinergie	26
1.3.8. Normes de performance énergétique.....	26
1.4. Confort thermique	27
1.4.1. Notion de confort thermique	28
1.4.2. Échanges thermiques du corps humain avec son environnement	28
1.4.2.1. Bilan thermique	29
1.4.2.2. Échanges de chaleur sensible	30
1.4.2.3. Échanges de chaleur latente.....	33
1.4.3. Paramètres effectuant le confort thermique	35
1.4.3.1. Paramètres liés à l’ambiance extérieure	36
1.4.3.2. Paramètres liés à l’individu	38
1.4.4. Indices de confort thermique	39
1.4.4.1. Indice de vote moyen prévisible (PMV).....	39
1.4.4.2. Pourcentage prévisible d’insatisfaits (PPD)	40
1.4.4.3. Indice de la température effective	41
1.4.4.4. Indice de la température résultante.....	42
1.4.4.5. Indice de la température efficace.....	43
1.4.4.6. Indice de la température opérative.....	43
1.4.4.7. Indice de contrainte thermique	43
1.4.5. Diagrammes bioclimatiques	44
1.4.5.1. Diagramme bioclimatique d’Olgay	44
1.4.5.2. Diagramme bioclimatique de Givoni	45
1.4.5.3. Diagramme psychrométrique ASHRAE Standard 55	45
1.4.6. Facteurs d’inconfort thermique.....	47
1.5. Conception bioclimatique	47
1.5.1. Principes de base de la conception bioclimatique	47
1.5.1.1. Localisation du bâtiment	48
1.5.1.2. Orientation du bâtiment	48
1.5.1.3. Forme ou compacité du bâtiment	48
1.5.1.4. Organisation intérieure du bâtiment	49
1.5.1.5. Protection solaire	49
1.5.1.6. Ventilation naturelle	50
1.5.2. Stratégies de conception bioclimatique	50
1.5.2.1. Système de chauffage solaire passif (Confort d’hiver)	50
1.5.2.2. Système de refroidissement passif (Confort d’été).....	51
1.6. Conclusion	52

Chapitre 2 : Stratégies de refroidissement passif

2.1. Introduction.....	54
2.2. Principes de la stratégie de refroidissement passif	54
2.3. Stratégie de la ventilation naturelle	55
2.3.1. Types de la ventilation naturelle	57
2.3.1.1. Ventilation monolatérale (unidirectionnelle).....	57
2.3.1.2. Ventilation transversale	57
2.3.1.3. Ventilation par tirage thermique (effet cheminée)	57
2.3.1.4. Ventilation par effet du vent.....	58
2.3.1.5. Ventilation par atrium.....	59
2.3.1.6. Ventilation par échangeur de chaleur air-sol.....	59
2.3.2. Avantages et les inconvénients de la ventilation naturelle	60
2.4. Techniques de refroidissement passif	60
2.4.1. Refroidissement par cheminée solaire.....	61
2.4.2. Refroidissement par tours à vent.....	62
2.4.2.1. Tours à vent avec échangeur de chaleur air-sol.....	63
2.4.2.2. Tours à vent avec cheminée solaire	63
2.4.2.3. Tours à vent avec ventilation nocturne.....	64
2.4.2.4. Tours à vent intégrés à la cour ouverte.....	64
2.4.2.5. Tours à vent intégrés aux toits incurvés	65
2.4.3. Refroidissement par protection solaire	66
2.4.3.1. Microclimat urbain	66
2.4.3.2. Contrôle solaire	67
2.4.4. Refroidissement par évaporation.....	68
2.4.5. Refroidissement par la géothermie.....	69
2.4.5.1. Refroidissement par échangeur de chaleur air-sol.....	69
2.4.5.2. Refroidissement par construction souterraine	70
2.5. Conclusion	71

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

3.1. Introduction.....	73
3.2. Analyse bioclimatique et énergétique de la construction vernaculaire	73
3.2.1. Évolution de l'habitat traditionnel saharien.....	76
3.2.1.1. Ksar d'Ouargla	76
3.2.1.2. Ksar de M'Zab	77
3.2.1.3. Ksar de Béchar	79
3.2.1.4. Ksar de Biskra	80
3.3. Concepts de construction souterraine.....	82
3.4. Histoire de la construction souterraine.....	83
3.5. Avantages et inconvénients de la construction souterraine	90

3.6. Construction souterraine moderne	90
3.7. Nouveaux enjeux de la construction souterraine	93
3.8. Conclusion	94

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

4.1. Introduction.....	96
4.2. Géothermie	97
4.2.1. Types de la géothermie	97
4.2.1.1. Géothermie haute énergie	97
4.2.1.2. Géothermie basse énergie	97
4.2.1.3. Géothermie très basse énergie	97
4.2.2. Gradient géothermique.....	98
4.2.3. Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique	99
4.2.4. La géothermie en Algérie.....	100
4.3. Modélisation de la température du sol.....	101
4.3.1. Distribution du champ de températures dans le sol	102
4.3.1.1. Facteurs influant la température du sol.....	102
4.3.1.2. Relation de la conductivité thermique avec le flux de chaleur.....	102
4.3.2. Comportement général des températures du sol.....	104
4.4. Mesure expérimentale du profil de la température du sol.....	108
4.4.1. Description du dispositif expérimental.....	108
4.4.2. Résultats et discussion.....	111
4.4.2.1. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs	111
4.4.2.2. Profil des températures tri-horaires dans le sol	113
4.4.2.3. Validation expérimentale et confrontation des températures du sol.....	115
4.5. Conclusion	117

Chapitre 5 : Refroidissement par géothermie : Mesure expérimentale et modélisation

5.1. Introduction.....	119
5.2. Présentation de la région d'Ouargla	119
5.2.1. Situation géographique	119
5.2.2. Synthèse climatique.....	120
5.2.2.1. Températures	120
5.2.2.2. Humidité relative	121
5.2.2.3. Rayonnement solaire	122
5.2.2.4. Vents	122
5.2.2.5. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен	123
5.3. Descriptif de l'expérimentation	124
5.3.1. Descriptif de l'habitat étudié	124
5.3.2. Matériaux de construction.....	126

5.3.3. Instruments de mesure	126
5.4. Choix des outils de la simulation	128
5.4.1. Google SketchUp	129
5.4.2. TRNSYS	130
5.4.3. TRNBuild	131
5.4.4. METEONORM	132
5.5. Modélisation du bâtiment sous TRNSYS 18	133
5.5.1. Données météorologiques	133
5.5.2. Démarche (déroulement) de la simulation	134
5.6. Résultats et discussion	140
5.6.1. Validation expérimentale et confrontation des températures.....	140
5.6.2. Evaluation du confort thermique.....	142
5.6.3. Effet de l'orientation sur les températures intérieures.....	148
5.6.4. Comparaison des charges thermiques.....	148
5.6.5. Besoins énergétiques en chauffage et en climatisation.....	151
5.7. Étude économique.....	153
5.7.1. Besoins en climatisation	153
5.7.2. Coût annuel de l'énergie de refroidissement.....	154
5.7.3. Coût d'investissement total	155
5.7.4. Temps de retour sur investissement	155
5.8. Conclusion	156
Conclusion générale et perspectives.....	157
Références bibliographiques.....	160
ANNEXES.....	172
ملخص.....	176
Résumé.....	176
Abstract.....	177

Liste des figures

Fig.0.1. Structure de la thèse	5
Fig.1.1. Consommation mondiale d'énergie par produit.....	9
Fig.1.2. Consommation finale mondiale d'énergie par secteur.....	10
Fig.1.3. Production mondiale d'électricité en 2019	10
Fig.1.4. Mix d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et contribution des diverses technologies en 2019	12
Fig.1.5. Consommation finale nationale d'énergie par produit.....	13
Fig.1.6. Consommation finale nationale d'énergie par secteur.....	13
Fig.1.7. Répartition du projet des logements HPE	18
Fig.1.8. Évolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le Ministère de l'Énergie et des Mines	19
Fig.1.9. Catégories de Passivhaus, (a) "Classic", (b) "Plus" & (c) "Premium".....	23
Fig.1.10. Cibles de la démarche HQE	24
Fig.1.11. Interaction thermique entre le corps humain et son environnement	29
Fig.1.12. Échanges thermiques par conduction.....	30
Fig.1.13. Échanges thermiques par convection.....	31
Fig.1.14. Échanges thermiques par rayonnement	32
Fig.1.15. Échanges thermiques par évaporation	33
Fig.1.16. Échanges thermiques par respiration	34
Fig.1.17. Bilan thermique du corps humain	35
Fig.1.18. Valeurs exprimées en clo des tenues vestimentaires	39
Fig.1.19. Évolution de l'indice PPD en fonction de l'indice PMV	40
Fig.1.20. Nomogramme de la température effective.....	41
Fig.1.21. Nomogramme de la température résultante	42
Fig.1.22. Diagramme bioclimatique d'Olgay.....	44
Fig.1.23. Diagramme bioclimatique de Givoni.....	45
Fig.1.24. Modèle de confort adaptatif utilisé dans la norme ASHRAE 55.....	46
Fig.1.25. Concepts de la stratégie du chaud	51
Fig.1.26. Concepts de la stratégie du froid.....	52

Fig. 2.1. Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie	55
Fig. 2.2. Distribution de la pression du vent autour d'un bâtiment.....	56
Fig. 2.3. Effet de tirage thermique dans un bâtiment	56
Fig. 2.4. Ventilation monolatérale (a) à simple ouverture (b) à doubles ouvertures.....	57
Fig. 2.5. Ventilation transversale.....	57
Fig. 2.6. Ventilation par tirage thermique (effet cheminée).....	58
Fig. 2.7. Ventilation par effet du vent	58
Fig. 2.8. Ventilation par atrium	59
Fig. 2.9. Ventilation par échangeur de chaleur air-sol	60
Fig.2.10. Schéma d'une cheminée solaire (a) verticale et (b) inclinée	61
Fig.2.11. Tours à vent traditionnelles avec un nombre différent d'ouvertures.....	62
Fig.2.12. Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain	63
Fig.2.13. Système de Tour à vent intégrée avec une cheminée solaire.....	64
Fig.2.14. Maison traditionnelle qui combine la cour ouverte avec les tours à vent.....	65
Fig.2.15. Tour à vent intégrée avec un toit incurvé.....	66
Fig.2.16. Différents systèmes d'évaporation utilisés dans les tours à vent.....	69
Fig.2.17. Échangeur air-sol en fonctionnement durant les jours de l'été	70
Fig.2.18. Constructions souterraines	71
Fig.3.1. Habitats construits entièrement en matériaux de construction locaux.....	76
Fig.3.2. Ksar d'Ouargla.....	76
Fig.3.3. Ksar de M'Zab	78
Fig.3.4. Ksar de Béchar	79
Fig.3.5. Ksar de Biskra.....	81
Fig.3.6. Classification du bâtiment souterrain.....	83
Fig.3.7. Maison souterraine à Matmata, Tunisie.....	84
Fig.3.8. Maison souterraine à Gharyan, Libye	85
Fig.3.9. Logements troglodytiques dans la ville de Sanmenxia, Chine	86
Fig.3.10. Habitations troglodytiques en Cappadoce, Turquie.....	87
Fig.3.11. Villa Flower Petals, Bolton, Royaume-Uni	91
Fig.3.12. Villa souterraine à Vals, Suisse	92

Fig.3.13. Vision souterraine du "gratte-terre" dans la ville de Mexico.....	93
Fig.4.1. Origine de la chaleur de la Terre.....	96
Fig.4.2. Évolution de la température en fonction de la profondeur.....	98
Fig.4.3. Carte de gradient géothermique du Sud algérien.....	101
Fig.4.4. Quelques valeurs de la conductivité thermique	103
Fig.4.5. Position géographique de la zone d'étude.....	106
Fig.4.6. Température moyenne quotidienne du sol en 2020	107
Fig.4.7. Variation de la température et de l'humidité relative dans la ville d'Ouargla (juin, juillet et août 2020).....	108
Fig.4.8. Lieu d'implantation du site de l'étude sur Google Maps	109
Fig.4.9. Préparation et installation du dispositif expérimental.....	110
Fig.4.10. Implantation de thermocouples aux différentes profondeurs (0,5, 1, 1,5 et 2 mètres)	111
Fig.4.11. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol argileux	112
Fig.4.12. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol limono-argileux	112
Fig.4.13. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol sableux	113
Fig.4.14. Températures dans le sol mesurées : (a) 08 août 2020, (b) 11 août 2020, (c) 15 août 2020, et (d) 17 août 2020.....	114
Fig.4.15. Température de l'air ambiant et rayonnement solaire global le 08 août 2020, 11 août 2020, 15 août 2020 et 17 août 2020.....	115
Fig.4.16. Températures dans le sol mesurées et calculées durant la journée du 08 août 2020	116
Fig.5.1. Situation géographique d'Ouargla	120
Fig.5.2. Température mensuelle minimale et maximale à Ouargla (1991-2020).....	121
Fig.5.3. Humidité relative mensuelle minimale et maximale à Ouargla (1991-2020).....	121
Fig.5.4. Rayonnement solaire globale à Ouargla durant l'année 2020	122
Fig.5.5. Vents dominants enregistrés à Ouargla sur la période (1991-2020).....	123
Fig.5.6. Diagramme Ombrothermique d'Ouargla (1991-2020).....	124

Fig.5.7. Plan descriptif de la salle étudiée	124
Fig.5.8. Vue réelle de la salle souterraine étudiée : (A) Entrée, (B) Escaliers, (C) Couloir et (D) Milieu de la salle	125
Fig.5.9. Capteurs et appareils de mesure utilisés dans l'étude expérimentale	127
Fig.5.10. Montage de l'acquisition des données à l'intérieur de la salle souterraine.....	127
Fig.5.11. Interface graphique de Google Sketch Up (Création d'un modèle 3D).....	129
Fig.5.12. Interface graphique du logiciel TRNSYS	130
Fig.5.13. Interface graphique de TRNBuild.....	132
Fig.5.14. Création de fichier météo sur METEONORM	133
Fig.5.15. Schéma des étapes de la simulation	135
Fig.5.16. Modèle 3D de la salle souterraine étudiée et la salle au-dessus du sol sous Google SketchUp.....	136
Fig.5.17. Maquette numérique du Studio : (a) Plan opaque, (b) plan semi-transparent....	137
Fig.5.18. Définir la composition des parois sur TRNBuild	138
Fig.5.19. Simulation sous TRNSYS studio.....	139
Fig.5.20. Variation de la température extérieure et intérieure moyenne horaire.....	141
Fig.5.21. Écart des températures horaires intérieures et extérieures	142
Fig.5.22. Variation de l'humidité relative extérieure et intérieure moyenne horaire	143
Fig.5.23. Écart de l'humidité relative horaire intérieure et extérieure	144
Fig.5.24. Situation du confort le 20/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798.....	145
Fig.5.25. Situation du confort le 21/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798.....	146
Fig.5.26. Situation du confort le 22/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798.....	147
Fig.5.27. Situation du confort le 23/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798.....	148
Fig.5.28. Trajectoire solaire d'Ouargla le 21/08/2020 : (a) Lever du soleil (b) coucher du soleil	148
Fig.5.29. Température de l'air intérieur de la salle souterraine avec différentes orientations, le 21 août 2020	149
Fig.5.30. Comparaison entre la température horaire de la salle souterraine et de la salle au-dessus du sol.....	150
Fig.5.31. Besoins annuels en chauffage et en climatisation.....	151

Fig.5.32. Besoins mensuels en chauffage et en climatisation.....	152
Fig.5.33. Coût énergétique global avec le temps de retour sur investissement (Besoins en refroidissement).....	156

Liste des tableaux

Tableau. 1.1. Capacités de production d'électricité à base de ressources renouvelables sur le monde sur la période (2015-2019).....	11
Tableau.1.2. Part de chacune des ressources renouvelables primaires retenues	19
Tableau.1.3. Planning de réalisation du programme (Version 2011).....	20
Tableau.1.4. Plan d'exécution du PNEREE révisé en 2015.....	20
Tableau.1.5. Quantité de vapeur d'eau saturante dans l'air selon sa température.....	37
Tableau.1.6. Valeurs du métabolisme en fonction de l'activité réalisée.....	38
Tableau.1.7. Échelle des sensations de confort en fonction en PMV (échelle de Fanger).40	
Tableau.4.1. Températures mensuelles du sol pour la ville d'Ouargla durant l'année 2020	106
Tableau.4.2. Nature des sols et propriétés physiques.....	107
Tableau.5.1. Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction	126
Tableau.5.2. Caractéristiques des paramètres météorologiques mesurées et instruments correspondants	128
Tableau.5.3. Données météorologiques d'Ouargla (Station Météo d'Ouargla 2020).....	134
Tableau.5.4. Caractéristiques et propriétés thermo-physiques des différentes parois.....	139
Tableau.5.5. Paramètres du confort thermique le 20/08/2020.....	144
Tableau.5.6. Paramètres du confort thermique le 21/08/2020.....	145
Tableau.5.7. Paramètres du confort thermique le 22/08/2020.....	146
Tableau.5.8. Paramètres du confort thermique le 23/08/2020.....	147
Tableau.5.9. Besoins en climatisation pour assurer un confort amélioré.....	151
Tableau.5.10. Besoins en climatisation, ls factures correspondantes et la subvention de l'état.....	153

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A	La diffusivité thermique	m^2s^{-1}
A_s	Amplitude annuelle de la température de surface	$^{\circ}C$
C	Taux de chaleur perdue par convection à la surface de la peau	W/m^2
C_p	La capacité thermique massique à pression constante	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$C_{respiration}$	Taux de chaleur perdue par convective respiratoire	W/m^2
e'	La tension de vapeur	kPa
$E_{respiration}$	Taux de chaleur perdue par évaporation respiratoire	W/m^2
E_{skin}	Taux total de chaleur perdue par évaporation à la surface de la peau	W/m^2
e_w	La tension de vapeur saturante	kPa
$f_{clothes}$	Le facteur d'habillement	-
$f_{effectif}$	Le coefficient effectif de surface rayonnante	-
$h_{evaporation}$	Coefficient de transfert de chaleur par évaporation	$W/m^2 \cdot kPa$
h_r	Le coefficient d'échange radiatif linéarisé	$W/m^2 \cdot K$
HR	L'humidité relative de l'air	%
K	Taux de chaleur perdue par conduction à la surface de la peau	W/m^2
M	Taux de chaleur métabolique produite	W/m^2
p_a	Pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant	kPa
$p_{skin,s}$	Pression de vapeur à la surface de la peau	kPa
$Q_{respiration}$	Taux total de chaleur perdue par la respiration	W/m^2
Q_{skin}	Taux total de chaleur perdue à la surface de la peau	W/m^2
R	Taux de chaleur perdue par rayonnement à la surface de la peau	W/m^2
$R_{evaporation,clothes}$	Résistance au transfert de chaleur par évaporation	$m^2 \cdot kPa/W$
S_{core}	Taux de chaleur stockée dans le centre du corps	W/m^2
S_{skin}	Taux de chaleur stockée dans la peau	W/m^2
T	Temps de l'année	Jours
T_{air}	La température d'air	$^{\circ}C$
$T_{amplitude,n}$	Amplitude de l'onde de température à la surface du sol	$^{\circ}C$

$T_{clothes}$	La température de la surface externe du vêtement	°C
$T_{opérative}$	La température opérative	°C
t_p	Période du cycle 365 de la température du sol	Jours
T_{parois}	La température des parois	°C
\bar{T}_r	La température radiante moyenne	°C
$T_{s,average}$	Température annuelle moyenne du sol à différentes profondeurs	°C
$T_s(z, t)$	Température inchangeable du sol à une profondeur z et temps t	°C
T_{conf}	La température de confort	°C
T_o	La température extérieure moyenne mensuelle	°C
W	Taux de travail mécanique accompli	W/m ²
Z	Profondeur du sol	m

Lettres grecques

λ	La conductivité thermique du matériau	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ	La masse volumique	kg/m ³
ε	L'émissivité moyenne du corps	-
σ	La constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$	W/m ² K ⁴
ω	Mouillure de la peau	-
β	Facteur de correction	-
α_s	Diffusivité thermique du sol	m ² /jour

Abréviations

AADL	: Agence Nationale d'Amélioration et du Développement du Logement
AIE	: Agence Internationale de l'Energie
APRUE	: Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers
BBC	: Bâtiments à Basse Consommation
BCA	: Building and Construction Authority
BEPOS	: Bâtiments à Energie POSitive
BREEAM	: Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BZE	: Bâtiments Zéro-Energie

CDER	: Centre de D éveloppement des E nergies R enouvelables
CEREFÉ	: Commissariat aux E nergies R enouvelables et à l' E fficacité E nergétique
COVID-19	: C ORona V irus D isease 2019
CREG	: Commission de R égulation de l' E lectricité et du G az
FNME	: F ond National pour la M aitrise de l' E nergie
GES	: G az à E ffet de S erre
GPL	: G az de P étrole L iquéfié
HPE	: H aute P erformance E nergétique
HQE	: H aute Q ualité E nvironnementale
IRENA	: International R enewable E nergy A gency
LEED	: L eadership in E nergy and E nvironmental D esign
LPA	: L ogement P romotionnel A idé
LPL	: L ogement P ublic L ocatif
LPP	: L ogement P romotionnel P ublic
LSP	: L ogement S ocial P articipatif
Mtep	: M éga / M illion tonne équivalent p étrole
OPGI	: O ffice de P romotion et de G estion I mmobilière
Passivhaus	: P assive H ouse
PMV	: P redicted M ean V ote
PNEREE	: P rogramme National de D éveloppement des E nergies R enouvelables et de l' E fficacité E nergétique
PNME	: P rogramme National de M aitrise de l' E nergie
PPD	: P redicted P ercentage of D issatisfied
TRNSYS	: T RaNsient S Ystems S imulation
STD	: S imulation T hermique D ynamique

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début de l'existence humaine, l'habitat est considéré comme l'un des éléments de base pour la survie et la protection contre des conditions naturelles difficiles. Les maisons sont l'endroit où les gens passent la majorité de leur temps. Les activités d'habitation comprennent : dormir, manger et se détendre. Les maisons sont conçues et construites pour répondre aux besoins de leurs occupants en matière d'abri, d'espace et d'intimité. Elles sont un atout économique et un élément important de l'identité d'un individu vis-à-vis de la société.

Les problèmes urgents auxquels l'humanité est confrontée au cours de ce siècle et peut-être les siècles suivants sont la crise énergétique et la demande croissante de logements causée par la croissance continue de la population mondiale.

En Algérie le secteur du bâtiment est l'un des secteurs dont la consommation a un impact significatif sur la consommation globale d'énergie soit 43% de la consommation finale et 25% des émissions de CO₂ (Ministère de l'Énergie, 2020). Il s'avère donc nécessaire de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments à basse consommation d'énergie et ensuite la conception des bâtiments à énergie positive.

Le Sahara Algérien est caractérisé par un climat très sévère (sec et chaud). La période chaude est trop longue et s'étale presque sur la moitié de l'année (du mois de mai au mois d'octobre). Au cœur d'été, la température franchit les 50 °C à l'ombre surtout dans nos régions. Malheureusement, l'architecture adoptée actuellement est très énergivore et n'est pas adaptée au climat de la région, ce qui fait élever la demande d'énergie électrique en climatisation et la demande dépasse parfois l'offre dans les moments de la pointe dans la période estivale et cela entraîne souvent à des coupures de courant électrique et des endommagements des installations électriques (Benhammou et al., 2015).

Le terme « Techniques de refroidissement passif » sont des solutions simples qui permettent d'abaisser la température intérieure du bâtiment par l'utilisation de sources d'énergie naturelles et renouvelables ainsi que des systèmes de basse énergie en consommant beaucoup moins d'électricité que la climatisation conventionnelle. Le terme « passif » n'exclut pas l'introduction de la ventilation naturelle hybride quand leur application permet de valoriser au mieux les forces motrices naturelles que sont le vent (tirage éolien) et le tirage thermique et par conséquent améliorer les performances énergétiques.

Introduction générale

Alors que de nombreux architectes et scientifiques se tournent vers les énergies renouvelables dérivées du soleil et du vent, d'autres décident d'exploiter les possibilités de la terre (la géothermie). En fait, ils ne parviennent pas à s'entendre sur une terminologie normalisée pour désigner la construction souterraine « underground » ou enfouies « earth sheltered » (Russell, 2007).

La construction souterraine est l'une des solutions géothermie passive, simple et durable qui a été adoptée par l'architecture vernaculaire traditionnelle dans les régions chaudes et arides pour assurer des conditions de vie acceptables à l'intérieur des maisons, comme il est communément admis, que la température du sol est quasi stable durant toute l'année à partir d'une profondeur de quelques mètres.

Les habitations souterraines ont été la plus ancienne forme d'abri connue de l'homme qui pourrait être retracée à des époques anciennes. Aujourd'hui ces types d'habitations souterraines sont utilisés dans diverses parties du monde grâce à des nouvelles approches technologiques. Les habitations souterraines sont conçues et modélisées pour la conservation de l'environnement naturel ainsi que la protection contre la pollution et l'économie des ressources énergétiques autant que possible. Ce type de bâtiment fournit une température confortable et acceptable à ses occupants durant toute l'année et dans différentes conditions météorologiques.

L'objectif principal de notre thèse est d'étudier le potentiel de réduction de la demande énergétique des bâtiments souterrains par rapport aux bâtiments au-dessus du sol. Cette thèse s'inscrit parfaitement dans le cadre de la stratégie d'efficacité énergétique qui vise à optimiser la consommation énergétique dans les bâtiments tout en améliorant leur confort thermique. Cette étude propose une approche qui englobe l'intégration d'une technique passive appropriée à l'environnement local, afin de d'apporter des solutions aux exigences du confort thermique et de réduire les besoins en climatisation dans les zones chaudes et arides. Ce travail consiste à étudier expérimentalement et numériquement d'une part le profil vertical de la température dans le sol, et d'autre part l'évaluation de la technique de refroidissement passif (la construction souterraine) dans les conditions climatiques sévères du Sahara Algérien.

Cela qui nous amène à poser les questions fondamentales suivantes :

- Peut-on avoir du confort thermique sans consommer de l'énergie?
- Peut-on réduire la consommation d'énergie sans sacrifier le confort thermique dans les bâtiments?

Introduction générale

- Comment minimiser l'énergie en maximisant le confort thermique dans les bâtiments?
- Quelle démarche à suivre et quel outil adapté pour valider les résultats?

Afin de répondre à ces questions et atteindre les résultats escomptés dans ce travail, une démarche méthodologique est proposée, axée sur les mesures expérimentales et la modélisation des bâtiments (Fig.0.1).

Notre travail sera structuré en deux parties distinctes qui s'agencent de la manière suivante : la première reposera sur une réflexion théorique et la deuxième sera plutôt analytique (étude expérimentale et simulation). Pour ce faire, notre manuscrit sera subdivisé en cinq chapitres précédés d'une introduction générale.

Le premier chapitre présente le contexte énergétique mondial et algérien et surtout la consommation de l'énergie dans le secteur du bâtiment afin de comprendre le comportement thermique de la structure du bâtiment. Nous présentons aussi quelques concepts généraux directement liés au cœur de notre sujet de recherche. Nous nous analysons d'abord les connaissances existantes en matière de l'efficacité énergétique, ses classifications et les certifications énergétiques existantes dans le monde. Nous consacrons une partie de ce chapitre à approfondir les connaissances sur la notion de confort thermique et la conception bioclimatique, ses principes de base et ses stratégies.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les solutions et les techniques de refroidissement passif existantes, leurs principes de fonctionnements, les paramètres qui ont une influence sur elles et leurs rentabilités. Ce chapitre présente les différentes techniques passives ou semi-passives appliquées aux bâtiments énergivores.

C'est la construction souterraine qui constitue notre axe de réflexion dans le troisième chapitre. Ceci nous conduit à effectuer un état de l'art qui permet de présenter les concepts de la construction souterraine et son évolution à travers l'histoire où nous découvrons que la plupart de cette architecture se trouve largement dans des régions comme l'Asie et l'Afrique du Nord depuis l'existence de l'homme sur Terre. Ensuite, la présentation de plusieurs expériences internationales en matière de l'architecture souterraine permet d'identifier ce qui a conduit certaines villes à privilégier le souterrain dans certains cas et parfois à intégrer le sous-sol dans leur planification. Avant cela, nous présentons la construction vernaculaire représentée par les anciens Ksour à savoir : Ksar d'Ouargla, Ksar de M'Zab (Ghardaia), Ksar de Béchar et Ksar de Biskra.

Le développement d'un modèle mathématique du profil vertical de la température du sol, fait l'objet du quatrième chapitre. Nous étudions aussi l'influence de la nature du sol

Introduction générale

sur la température en profondeur du sol, ainsi que sur le déphasage et la profondeur de pénétration du signal de température à travers une étude expérimentale. Nous passons ensuite à l'analyse des résultats de l'expérimentation. Ces résultats sont comparés avec celles des sorties du modèle mathématique.

Le cinquième chapitre présente le protocole expérimental et numérique suivi pour évaluer simultanément, via les mesures le comportement thermique d'une salle souterraine située à Ouargla, et par la simulation thermique dynamique via le logiciel TRNSYS. Les relevés des capteurs installés dans la salle souterraine ont été ensuite comparés avec les résultats de la simulation. Par la suite nous avons comparé les besoins en chauffage et en climatisation de la salle souterraine et celles d'une autre salle au-dessus du sol dans le même bâtiment, ce qui nous a permis de mener une étude économique sur la rentabilité de ce type de construction en utilisant l'indicateur de temps de retour sur investissement.

Finalement, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume tous les résultats obtenus suivis de quelques recommandations et perspectives en plus des annexes.

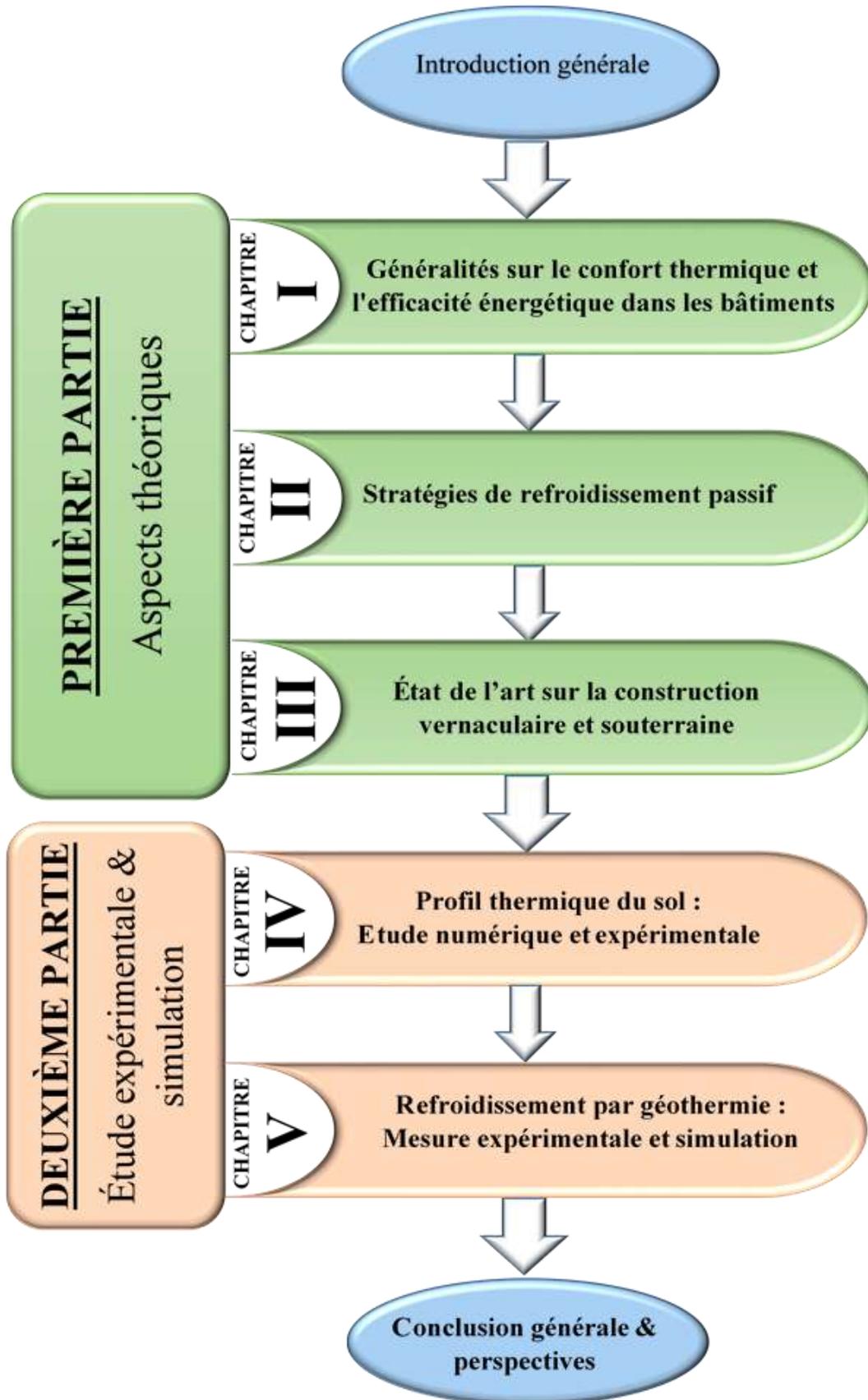


Fig.0.1. Structure de la thèse

CHAPITRE 1

Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.1. Introduction

Après la crise énergétique mondiale des années 70, une nouvelle pratique de la construction appelée la construction bioclimatique a été développée. Cette construction peut être définie comme étant une architecture sensible aux problèmes environnementaux en visant à concilier l'efficacité énergétique et le confort des occupants de manière naturelle. C'est dans cette période que la construction bioclimatique a étudié les phénomènes physiques concernant le confort thermique de la construction vernaculaire afin de les comprendre et les reproduire dans une nouvelle architecture.

Ce chapitre présente le contexte énergétique dans les bâtiments et vise à établir quelques concepts généraux directement liés au cœur de notre sujet de recherche. En effet, nous proposons d'établir des définitions et des notions claires de certains concepts liés à l'optimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments qui constituent la base de notre thèse. Ceux-ci incluent des concepts tels que l'efficacité énergétique, le confort thermique et la conception bioclimatique.

1.2. Consommation d'énergie dans le contexte mondial et algérien

L'énergie est indispensable au développement socioéconomique et l'amélioration de la qualité de la vie humaine dans tous les pays (Kousksou et al., 2014). Assurer l'approvisionnement en énergie et minimiser les impacts environnementaux (qui en résultent direct du réchauffement climatique) sont certainement les plus grands défis liés aux progrès énergétiques du XXI^e siècle (Allouhi et al., 2015).

La consommation énergétique constitue un sujet important pour tous les pays du monde, y compris l'Algérie, vu que l'énergie constitue à la fois le problème et la solution du développement durable.

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. Néanmoins, à partir de 1850, la révolution industrielle a provoqué une augmentation brutale de la demande mondiale d'énergie pour fournir plus de confort dans les différents secteurs d'activités humaines et dans le secteur du bâtiment en particulier (Benzaama, 2017). La réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments est devenue un impératif incontournable.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.2.1. Consommation énergétique mondiale

La pandémie de COVID-19 a contraint les gouvernements du monde entier à imposer des restrictions strictes à la vie quotidienne pour empêcher la propagation du virus. Comme un verrouillage strict a été imposé dans le monde entier à partir du mois de mars 2020, une baisse significative de la demande d'électricité a été observée (Aruga et al., 2020).

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) (IEA, 2020) affirme que la réduction de la demande d'énergie après le confinement est due à une diminution de la demande du secteur des services et de l'industrie, mais une autre étude a montré que la consommation domestique des ménages a tendance à augmenter pendant la période de confinement (The Earth Institute, 2020). Cependant, la quantité d'énergie consommée dans le secteur des services et de l'industrie dépasse l'utilisation des ménages, et donc le confinement en général, a un impact négatif sur la consommation d'énergie. Par conséquent, dans de nombreux pays, la demande d'énergie a chuté après le verrouillage alors que le niveau des activités industrielles diminuait, et elle n'a commencé à augmenter que lorsque les affaires ont redémarré alors que les restrictions se sont assouplies.

1.2.1.1. Consommation mondiale par produit

La consommation mondiale d'énergie primaire s'élève à 583.9 EJ¹ en 2019, tirée essentiellement par celle du pétrole (33.1%) et un degré moins le charbon (27%), et le gaz naturel (24.2%).

La figure.1.1 montre que les énergies fossiles représentent 84,3% de l'énergie consommée. Le reste provient de ressources diverses comme l'hydroélectricité, les énergies renouvelables et le nucléaire (ACPP, 2021).

¹ Exajoule

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

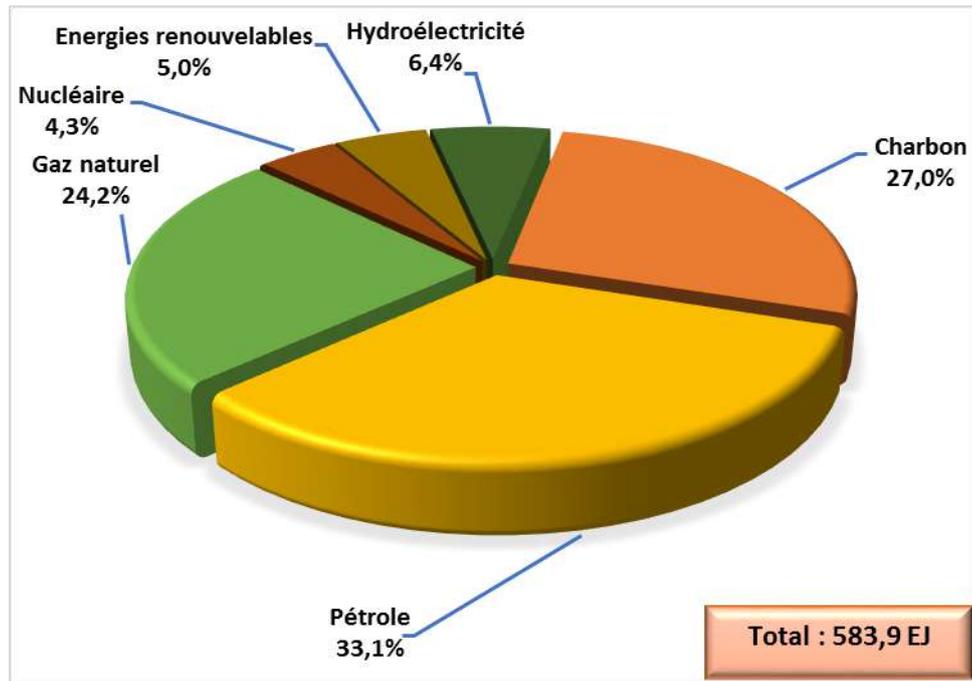


Fig.1.1. Consommation mondiale d'énergie par produit en 2019 (PB, 2021)

1.2.1.2. Consommation mondiale par secteur

À l'échelle mondiale, le premier secteur consommateur reste celui de l'industrie : elle prédomine le bilan des consommations énergétiques avec 37%, suivi par le secteur du bâtiment qui représente 30% de la consommation d'énergie et enfin le secteur de transport avec une part de 7,3%, comme illustré dans la figure.1.2 ci-après :

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

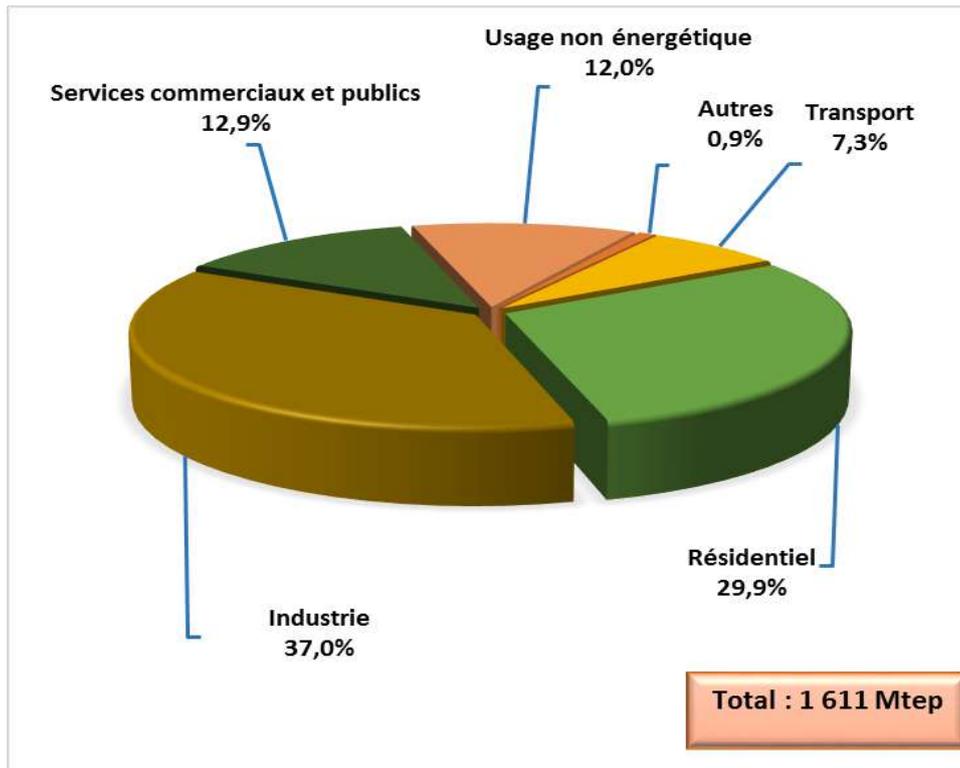


Fig.1.2. Consommation finale mondiale d'énergie par secteur en 2019 (PB, 2021)

1.2.1.3. Production mondiale d'électricité

En 2019, 62,8% de la production mondiale d'électricité était encore carbonée (Fig.1.3). Le mix de production électrique au niveau mondial reste encore largement dominé par le charbon (36,4% en 2019).

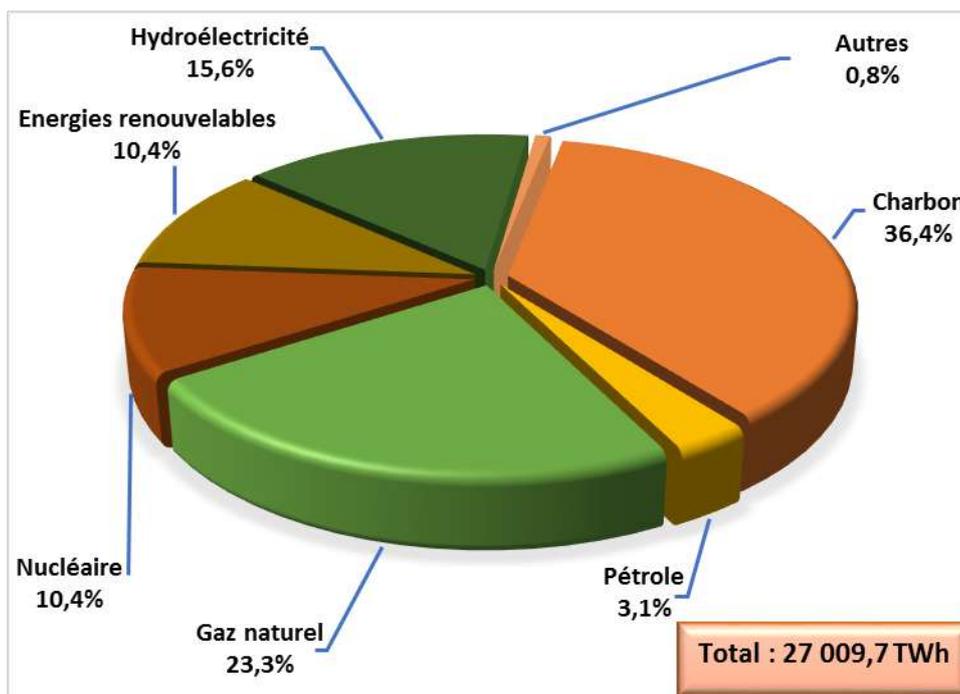


Fig.1.3. Production mondiale d'électricité en 2019 (PB, 2021)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.2.1.4. Capacités mondiales de production d'électricité à base de ressources renouvelables

Selon le rapport annuel « Statistiques de capacité renouvelable 2020 » de l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA) (IRENA, 2021), un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricité à base des principales ressources renouvelables dans le monde sur la période (2015-2019), pour chacune de ces filières, est donné dans le Tableau.1.1. Une brève analyse des statistiques ainsi présentées, permet déjà de dégager les premiers éléments qui pourraient aider à orienter objectivement les choix en matière de ressources renouvelables à développer dans le cadre d'une transition énergétique d'envergure.

Tableau. 1.1. Capacités de production d'électricité à base de ressources renouvelables dans le monde sur la période (2015-2019) (IRENA, 2021)

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189
Eolien (On et Offshore)	416	467	514	564	623
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586
Biomasse	97	105	111	117	124
Géothermie	12	12	13	14	15
Total (en GW)	1846	2009	2183	2361	2537

Ainsi, selon les capacités cumulées installées à ce jour, il apparaît que la contribution de l'hydroélectricité reste encore dominante (47%) quant à la génération d'électricité renouvelable dans le monde. Cependant, il faut remarquer que cette part qui était de 60% il y a seulement cinq ans, a régulièrement régressé (Fig.1.4) pour laisser place principalement à l'électricité éolienne (23.5%) et au solaire photovoltaïque (22.8%) en 2019. Quant à la contribution mixte de la biomasse et la géothermie dans la production d'électricité renouvelable, elle reste faible (5.7%) et présente une évolution très limitée.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

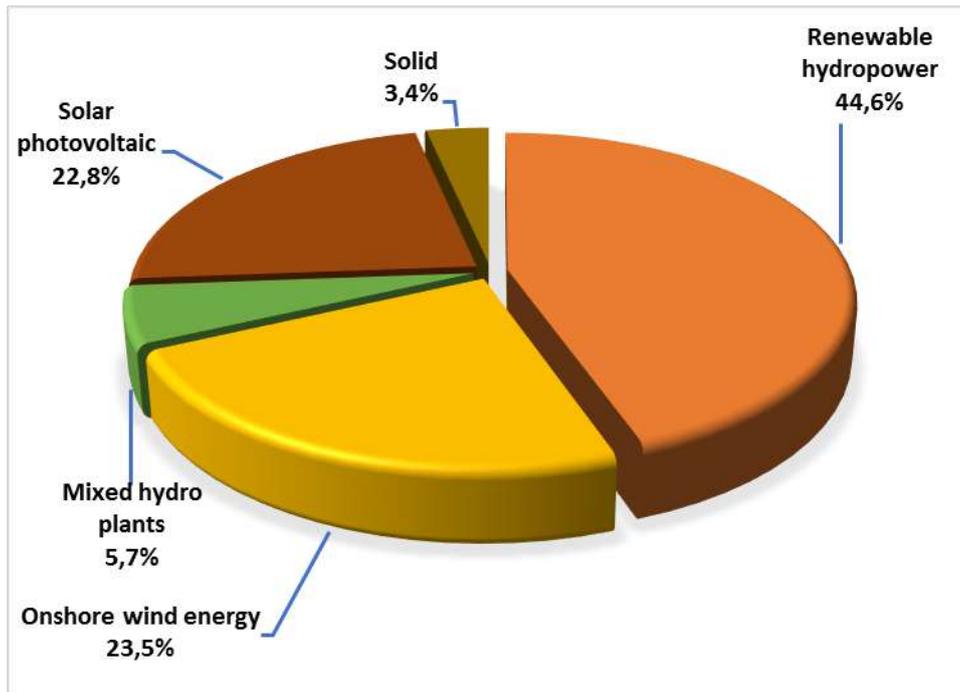


Fig.1.4. Mix d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et contribution des diverses technologies en 2019 (IRENA, 2021)

1.2.2. Consommation énergétique en Algérie

La consommation nationale finale s'élève à 50,4 Mtep en 2019 contre 48,1 Mtep en 2018, reflétant une hausse de 2,2 Mtep, soit (+4,6%), tirée essentiellement par celle du gaz naturel, et un degré moins les produits pétroliers, les GPL et l'électricité (Ministère de l'Énergie, 2020).

1.2.2.1. Consommation nationale par produit

S'agissant de la répartition de la consommation finale par produit, et comme illustré dans la figure.1.5, nous constatons l'importance de la part du gaz naturel (33.8%), suivi par les produits pétroliers (32.1%) et l'électricité (28.4%).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

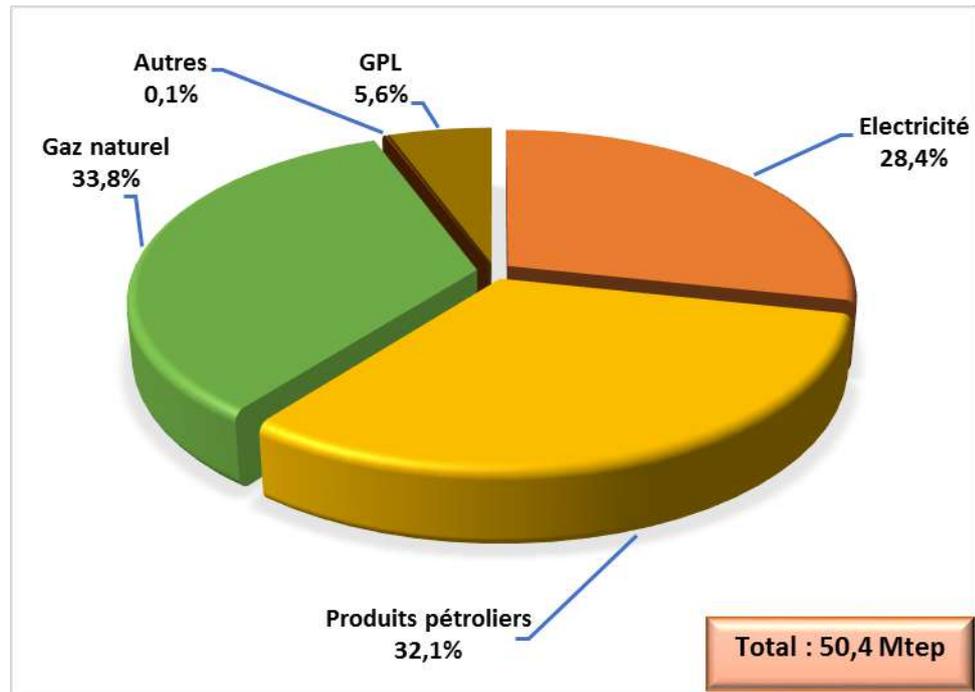


Fig.1.5. Consommation finale nationale d'énergie par produit en 2019 (Ministère de l'Énergie, 2020)

1.2.2.2. Consommation nationale par secteur

La structure de la consommation finale reste dominée par le secteur résidentiel (46,7%), soit 23.5 Mtep, suivi par le transport (30,6%), soit 15.4 Mtep et enfin le secteur de l'industrie avec une part de 22,7%, soit 11.4 Mtep, comme illustré dans la figure.1.6 ci-après :

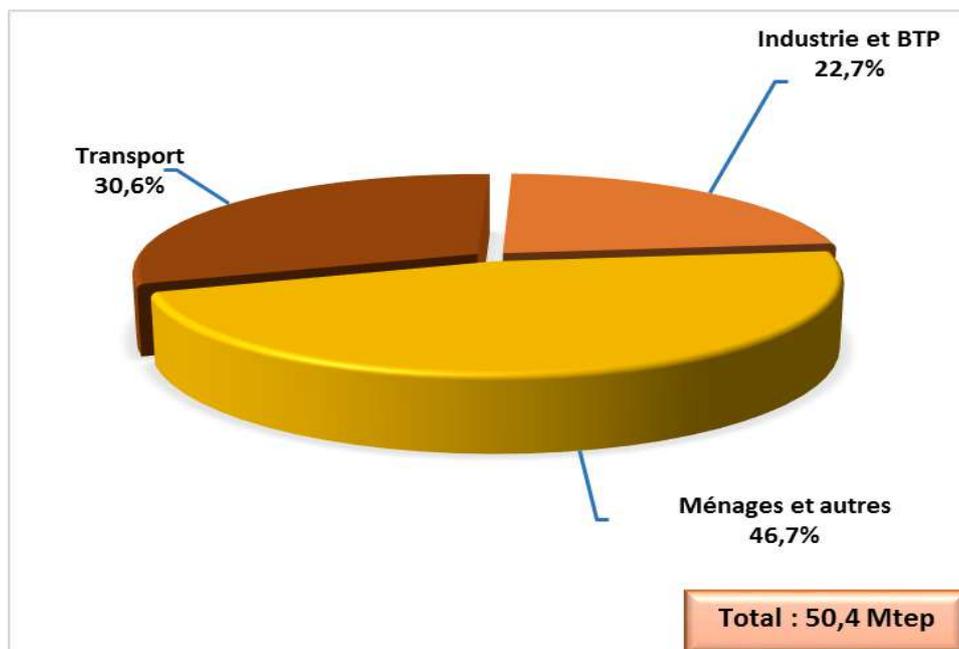


Fig.1.6. Consommation finale nationale d'énergie par secteur en 2019 (Ministère de l'Énergie, 2020)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.2.2.3. Consommation énergétique dans le secteur résidentiel

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie, il absorbe près de 47% de la consommation totale d'énergie finale conformément au bilan énergétique national 2019.

Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures pour des raisons de :

- La croissance démographique trop rapide ;
- L'évolution importante du parc du bâtiment suite aux grands programmes annoncés par le gouvernement Algérien : LSP, LPA, LPL, AADL, LPP, etc. ;
- L'augmentation sensible du taux d'utilisation des équipements et appareils électroménagers (climatisation, chauffage, réfrigération, etc.).

1.3. Efficacité énergétique dans le bâtiment

Il existe de nombreuses définitions de l'efficacité énergétique dans la littérature, ce qui peut parfois rendre difficile la compréhension du terme et ses applications. En physique, « **l'efficacité énergétique** » désigne le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour le faire fonctionner. Cette notion est souvent interprétée dans un sens plus large pour désigner les technologies et les pratiques permettant de diminuer la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de performance finale équivalent (Simona et al., 2017).

Afin de clarifier ce concept et en faire un guide de développement, il est important de le comprendre. Obtenez une plus grande efficacité énergétique tout en utilisant une petite quantité de ressources pour recevoir le même service. Cela permet de réduire l'empreinte écologique, notamment les émissions des gaz à effet de serre (GES).

1.3.1. Avantages de l'efficacité énergétique

En augmentant l'efficacité énergétique, nous consommons moins d'énergie et nous réduisons en même temps les émissions de GES, protégeant ainsi l'environnement et la sécurité d'approvisionnement énergétique est également renforcée. En outre n'oublions pas qu'en adoptant des solutions passives, nous dépensons moins d'argent en énergie (Rahmouni, 2020). Les avantages de l'efficacité énergétique comprennent :

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

- a) **Sur le plan environnemental** : Une efficacité accrue peut réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la qualité de l'air, ainsi que de l'eau.
- b) **Sur le plan économique** : Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments existants en général coûte moins cher que d'investir dans des bâtiments de nouvelle génération. L'efficacité énergétique peut également stimuler l'économie locale.
- c) **Sur le plan de la demande énergétique** : Lorsqu'elle est intégrée aux plans de ressources énergétiques, l'efficacité énergétique peut offrir des avantages à long terme en réduisant la charge de base et la demande de pointe.

1.3.2. Réglementation thermique des bâtiments

Afin de résoudre les défis liés aux enjeux énergétiques, économiques et environnementaux dans le secteur du bâtiment, plusieurs lois et réglementations sont mises à disposition par les pays du monde. Nous présentons dans ce qui suit quelques réglementations thermiques des bâtiments de certains pays au monde et de la région.

1.3.2.1. Réglementation américaine

L'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers plus connue sous le nom (ASHRAE) est une organisation internationale technique spécialisée dans le domaine du génie thermique et de la climatisation (chauffage, ventilation, climatisation, production de froid). Elle a développé en 1974 la première norme de mesure sur les consommations énergétiques dans le bâtiment, ce qui a permis à cette société d'en créer plusieurs autres normes entre 1980 et 2013. En 1993 ASHRAE a développé des normes pour les bâtiments du secteur résidentiel (1998, 2000, 2003, 2006, 2009, 2012). Le code 2009-IECC est le plus utilisé dans les états américains (Benzaama, 2017).

1.3.2.2. Réglementation française

La première réglementation thermique en France a été adoptée en 1974 après le premier choc pétrolier de 1973 afin de réduire la facture énergétique. Depuis, la réglementation thermique française n'a jamais cessé d'évoluer, avec des exigences de plus en plus importantes jusqu'à la réglementation thermique 2012 (RT2012) passant par RT2000 et RT2005. Cette réglementation s'applique aux bâtiments neufs et introduit la conception bioclimatique du bâtiment par un coefficient de besoin bioclimatique. Il permet de mesurer la capacité d'un bâtiment à limiter les besoins de chauffage, de refroidissement

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

et d'éclairage artificiel, et ce, indépendamment des systèmes énergétiques et équipements choisis (eRT2012, 2021).

1.3.2.3. Réglementation espagnole

En Espagne, l'application de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) en rapport avec les exigences de performance énergétique du bâtiment se base sur le Code technique de la Construction (Código Técnico de la Edificación (CTE) - Ahorro de Energía). La réglementation concerne tous les bâtiments neufs ainsi que les bâtiments de plus de 1000 m² pour lesquels est effectuée une réhabilitation de plus de 25% de la surface (DPEB, 2021).

1.3.2.4. Réglementation tunisienne

La réglementation thermique en Tunisie a été publiée par l'Arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureau et par l'Arrêté du 01 juin 2009 pour les bâtiments à usage résidentiel. Elle vise à limiter les besoins énergétiques du bâtiment liés au conditionnement (Chauffage et Refroidissement), et améliorer les caractéristiques thermiques de l'enveloppe (ANME, 2021).

1.3.2.5. Réglementation marocaine

La réglementation thermique marocaine a été publiée par le décret N° 2-13-874 du 15 octobre 2014. Ce décret approuve le règlement général de construction fixant les règles de performance énergétique des constructions et instituant le Comité National de l'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment (AMEE, 2021).

1.3.2.6. Réglementation algérienne

La réglementation thermique est un ensemble de lois visant à la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, ceci pour assurer le confort thermique et réduire les émissions de polluants locaux. Dans ce contexte, la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie et les nouveaux textes réglementaires mis en œuvre récemment sont venus fixer le modèle de consommation énergétique national et définir le cadre général des différentes actions à mener pour parvenir le plus rapidement possible à une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles et à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique (Imessad et al., 2017).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Depuis quelques années, le gouvernement algérien mène une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques. Cette politique se décline à travers :

- L'Arrêté ministériel du 10 août 1997 portant approbation du document technique réglementaire (DTR C 3-4) relatif à la réglementation thermique des bâtiments « Règles de calcul des apports calorifiques - Climatisation » ;
- L'Arrêté ministériel du 10 décembre 1997 portant approbation du document technique réglementaire (DTR C 3-2) relatif à la réglementation thermique des bâtiments « Règles de calcul des déperditions calorifiques » ;
- La Loi N°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie ;
- Le Décret exécutif N°2000- 90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs ;
- Le Décret exécutif N° 04-149 du 19 mai 2004 fixant les modalités d'élaboration du programme national de maîtrise de l'énergie (PNME) ;
- L'Arrêté ministériel du 14 novembre 2005 portant approbation du document technique réglementaire (DTR C 3-31) relatif à la réglementation thermique des bâtiments « Ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation ».

1.3.3. Programme national de maîtrise de l'énergie

Le programme national de maîtrise de l'énergie (PNME) constitue le cadre de mise en œuvre de la maîtrise de l'énergie au niveau national. Il est établi sous la responsabilité du Ministre chargé de l'énergie et approuvé par le Gouvernement.

Selon l'article 26 de la loi N° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie, le PNME regroupe l'ensemble des projets, des mesures et des actions dans les domaines suivants :

- L'économie d'énergie ;
- L'économie inter-énergétique ;
- La promotion des énergies renouvelables ;
- L'élaboration des normes d'efficacité énergétique ;
- La réduction de l'impact énergétique sur l'environnement ;
- La sensibilisation, l'éducation, l'information et la formation en matière d'efficacité énergétique ;
- La recherche/développement en efficacité énergétique.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.3.4. Programme Eco-Bât

L'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de L'Énergie (APRUE) a lancé un programme pour mesurer l'efficacité énergétique dans le bâtiment dans la perspective d'intégrer cette démarche dans la construction et pour économiser la consommation d'énergie des ménages. Ce programme dénommé « Eco-Bât » a été lancé en collaboration avec 11 Offices de Promotion et de Gestion Immobilière (OPGI) afin de réaliser 600 logements de Haute Performance Énergétique (HPE) à travers le territoire national. Ces logements ont réparti sur les différentes zones climatiques de l'Algérie à travers 11 wilayas (Fig.1.7).

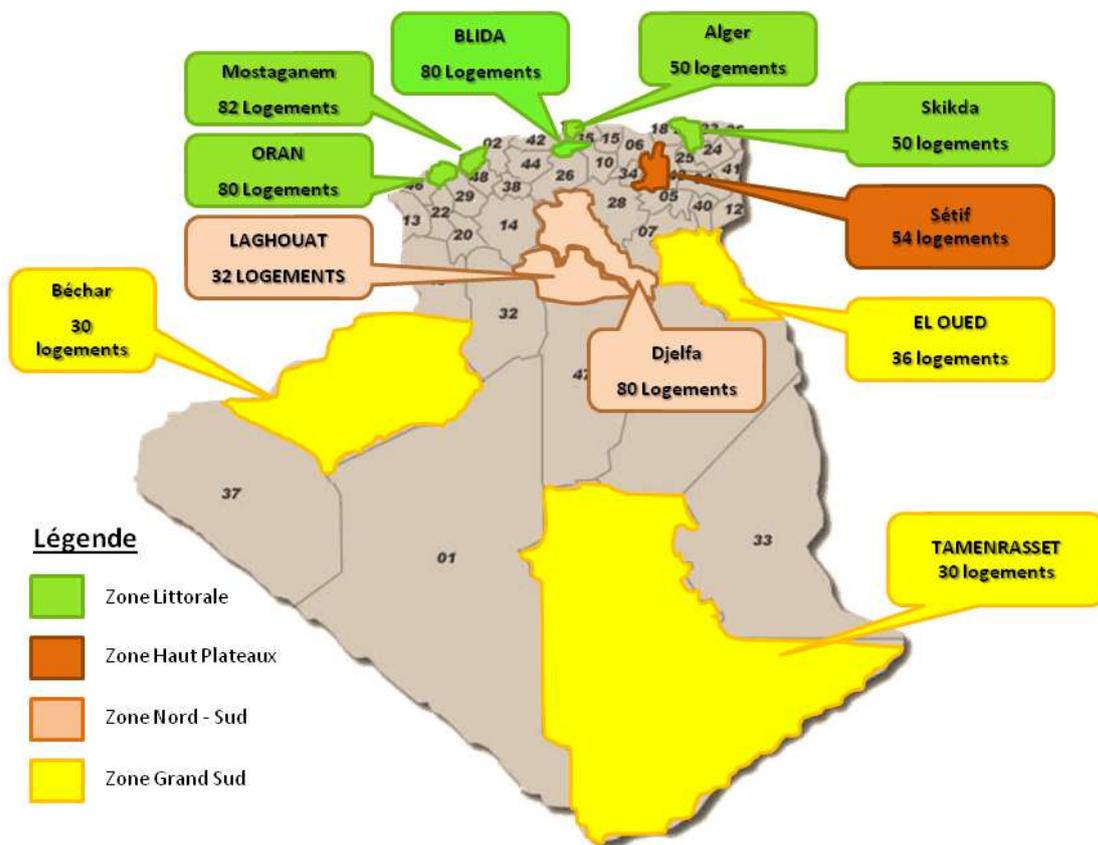


Fig.1.7. Répartition du projet des logements HPE (APRUE, 2021)

La mise en œuvre du programme Eco-Bât sera soutenue par des mesures incitatives sous forme d'expertise et d'un apport financier du Fond National pour la Maîtrise de l'Énergie (FNME).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.3.5. Programme National de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNEREE)

Le premier programme national dédié au développement et la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) en Algérie, a été adopté par le Gouvernement Algérien en date du 03 février 2011. Il ambitionnait un taux de 40 % de capacité de production d'électricité d'origine renouvelable à l'horizon 2030. Ceci étant sur la base d'une estimation de l'évolution de la puissance installée préalablement établie (Fig.1.8) et présentée par le Ministère de l'Énergie et des Mines, qui a tablé sur une consommation annuelle globale à terme de 150 TWh/an (MEM, 2011). Quantitativement, l'objectif était d'assurer une capacité de production d'électricité renouvelable de 22000 MW, dont 10000 MW seraient dédiés à l'exportation (Ministère de l'Énergie, 2020).

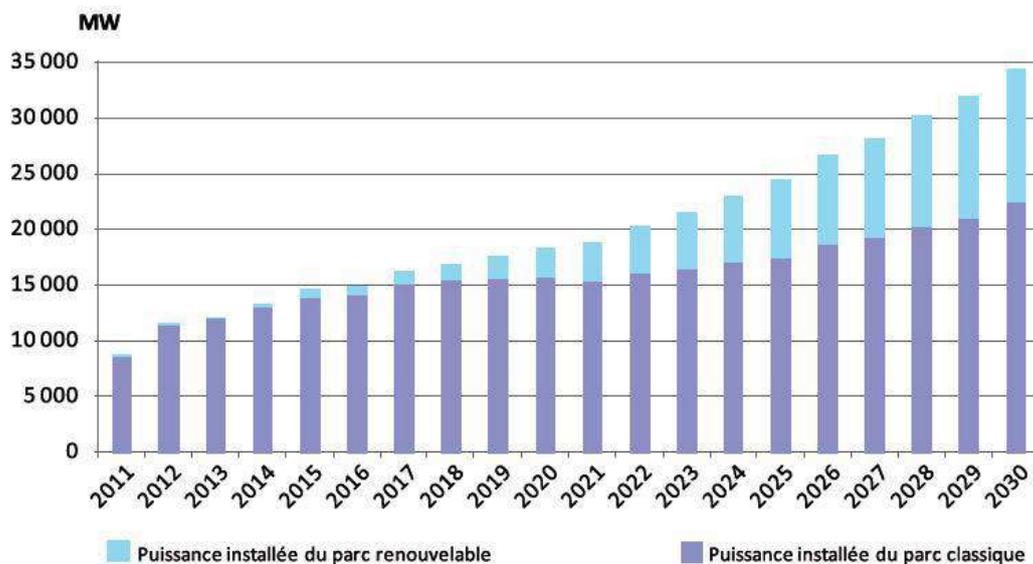


Fig.1.8. Evolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le Ministère de l'Énergie et des Mines (CEREFÉ, 2020)

Les moyens de production de l'électricité destinée au marché national (12000 MW), ont été planifiés selon le Ministère de l'Énergie et des Mines de l'époque, sur la base de trois principales ressources renouvelables (Tableau.1.2) et déployés selon quatre étapes (Tableau.1.3).

Tableau.1.2. Part de chacune des ressources renouvelables primaires retenues (CEREFÉ, 2020)

Solaire thermique à concentration (CSP)	Solaire photovoltaïque (PV)	Éolien	Total
7200 MW	2800 MW	2000 MW	12000 MW

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Tableau.1.3. Planning de réalisation du programme (Version 2011) (CEREFÉ, 2020)

Etape	Action
2011-2013	Réalisation de projets pilotes totalisant une capacité de 110 MW pour tester les différentes technologies
2014-2015	Début du déploiement du programme avec une l'installation d'une puissance totale de près de 650 MW
2016-2020	Déploiement à l'horizon 2020 d'une capacité minimale de 4600 MW, dont 2600 MW sont destinés au marché intérieur et 2000 MW à l'exportation
2021-2030	Déploiement à grande échelle du programme en vue d'atteindre à l'horizon 2030 les objectifs respectifs de 12000 MW, prévus pour la consommation locale et 10000 MW à mettre sur le marché international

La première version du PNEREE, éditée en 2011, a été essentiellement motivée en 2015 par les modifications notables dans le monde quant aux coûts d'investissement et de production d'électricité à base des diverses ressources renouvelables (Tableau.1.4).

Tableau.1.4. Plan d'exécution du PNEREE révisé en 2015 (CEREFÉ, 2020)

	1 ^{ère} Phase 2015-2020	2 ^{ème} Phase 2021-2030	Total (MW)
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
Total (MW)	4 525	17 475	22 000

Au mois de mars 2020, le programme de développement des énergies renouvelables d'une capacité de 16 000 MW à l'horizon 2035, et ce, exclusivement à base de solaire photovoltaïque, a été adopté par le gouvernement algérien, dont 15 000 MW raccordés au réseau électrique national et 1 000 MW en hors réseau (autoconsommation) (CEREFÉ, 2020).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.3.6. Classification des bâtiments à efficacité énergétique

1.3.6.1. Bâtiments zéro-énergie (BZE)

Le concept de bâtiment zéro-énergie (BZE) a suscité une grande attention au niveau international au cours des dernières années et désormais considéré comme l'objectif futur de la conception des bâtiments (Marszal et al., 2011). Parmi les différentes stratégies visant à réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, les BZE ont le potentiel prometteur de réduire de manière significative la consommation d'énergie et d'augmenter la part globale des énergies renouvelables. Donc, un bâtiment zéro-énergie peut être décrit comme un bâtiment dont les besoins énergétiques et/ou les émissions de carbone sont fortement réduits, grâce à des gains d'efficacité, tels que l'équilibre des besoins énergétiques fournis par des énergies renouvelables. Le BZE peut être désigné comme un bâtiment zéro-énergie et un bâtiment zéro-émission (D'Agostino & Mazzarella, 2019).

1.3.6.2. Bâtiments à énergie positive (BEPOS)

Une étape supplémentaire possible est représentée par les bâtiments à énergie positive (BEPOS) qui pourraient être considérés comme une sorte des bâtiments zéro-énergie (BZE), mais si efficaces qu'ils produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment, laissant aux utilisateurs un surplus d'énergie qu'ils peuvent utiliser à d'autres fins, comme l'alimentation d'appareils mobiles, d'outils électriques ou même de la voiture électrique (Magrini et al., 2020). Ceux-ci représenteraient donc une évolution du modèle BZE, puisque, en produisant plus d'énergie que nécessaire à leurs besoins, ils pourraient contribuer au soutien énergétique des autres bâtiments qui leur sont reliés, créant ainsi un système d'unités connectées entre elles au niveau du quartier, dans le but d'obtenir la positivité énergétique.

1.3.6.3. Bâtiments à basse consommation (BBC)

Le concept de bâtiment à basse consommation (BBC) met l'accent sur les économies d'énergie et l'aspect thermique. Abel (Abel, 1994) définit le bâtiment à basse consommation comme étant un bâtiment qui est utilisé pour développer et tester de nouvelles technologies visant non seulement à la diminution de la demande d'énergie pour le chauffage des locaux, mais aussi la diminution des besoins en électricité.

D'autres définitions ou noms utilisés sont les maisons avancées, bâtiments à haute performance, maisons sans chauffage conventionnel et maisons passives (Hastings, 2004).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Les maisons avancées sont des maisons à faible consommation d'énergie, à faible demande en ressources naturelles et à faible impact environnemental. Cette définition est donc plus large que celle d'un bâtiment à faible consommation d'énergie ou à haut rendement énergétique.

1.3.7. Certification énergétique des bâtiments (Labels)

Un label est une démarche volontaire qui permet d'aller plus loin que la réglementation thermique en vigueur. Des aides financières, fiscales ou urbanistiques y sont généralement attachées.

1.3.7.1. Label Passivhaus

Le label Passivhaus (Passive House) est un label allemand de performance énergétique des bâtiments. Le Passivhaus est un concept global de construction de bâtiment à très faible consommation d'énergie. Le but de ce concept est de créer des logements qui permettent de se passer de chauffage conventionnel.

Les bâtiments labélisés Passivhaus utilisent un système de ventilation imperceptible, procurant un air pur sans perception de courant d'air. L'unité de récupération de chaleur permet l'utilisation de la chaleur contenue dans l'air afin de chauffer l'intérieur.

Les économies d'énergie dans les grands bâtiments Passivhaus sont obtenus en utilisant en particulier les composants de construction éco-énergétiques et un système de ventilation de la qualité. Il n'y a absolument aucun arrière de coupe sur le confort, mais plutôt le niveau de confort est considérablement augmenté. Les constructions Passivhaus permettent de conserver un confort de haute qualité en utilisant simplement l'énergie dégagée dans le bâtiment (Environnement, 2021).

Pour être reconnu Passivhaus, un bâtiment doit répondre à plusieurs exigences :

- Besoin de chaleur et de rafraîchissement $\leq 15 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$,
- Consommation énergétique totale $\leq 120 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, évaluée à un besoin en énergie primaire renouvelable (E_{p-R}) $\leq 60 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$,
- Confort d'été : la fréquence de surchauffe (température intérieure $> 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Deux nouvelles catégories, "Passivhaus Plus" & "Passivhaus Premium" viennent d'être créées pour valoriser les bâtiments qui produisent de l'énergie renouvelable (Fig.1.9).

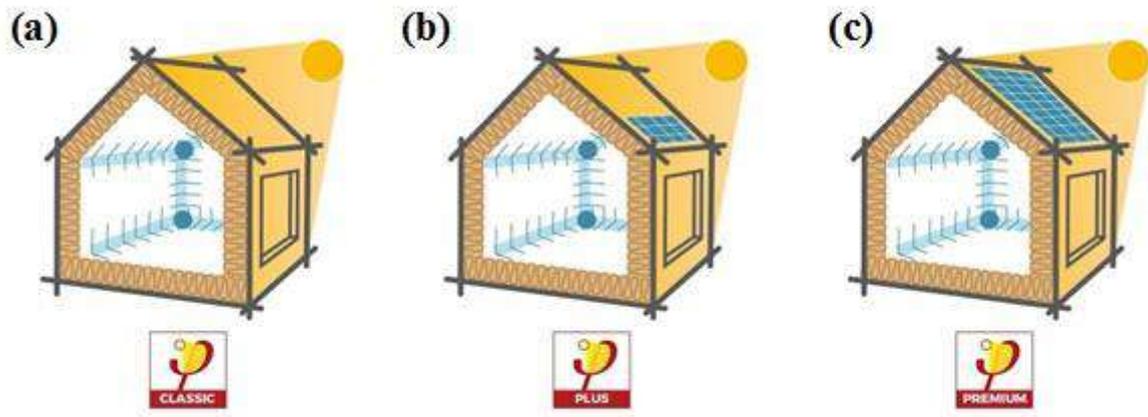


Fig.1.9. Catégories de Passivhaus, (a) "Classic", (b) "Plus" & (c) "Premium" (Environnement, 2021)

1.3.7.2. Label HQE

Le Label HQE (Haute Qualité Environnementale) est un concept environnemental datant du début des années 90. Le but du label HQE est d'être une marque commerciale référence pour la conception ou la rénovation du bâtiment et de limiter le plus possible leurs impacts sur l'environnement (Certivéa, 2021).

Afin d'obtenir le label HQE, le bâtiment doit respecter les cibles suivantes (Fig.1.10) :

- **Cibles d'éco-construction** : Les bâtiments doivent respecter des principes écologiques lors de la construction.
- **Cibles d'éco-gestion** : Le label HQE exige une bonne gestion au sein du bâtiment afin de respecter l'environnement.
- **Cibles de confort** : Le bâtiment dit HQE doit respecter le confort intérieur des résidents.
- **Cibles de santé** : Le bâtiment doit respecter des principes de bonne santé pour les occupants.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

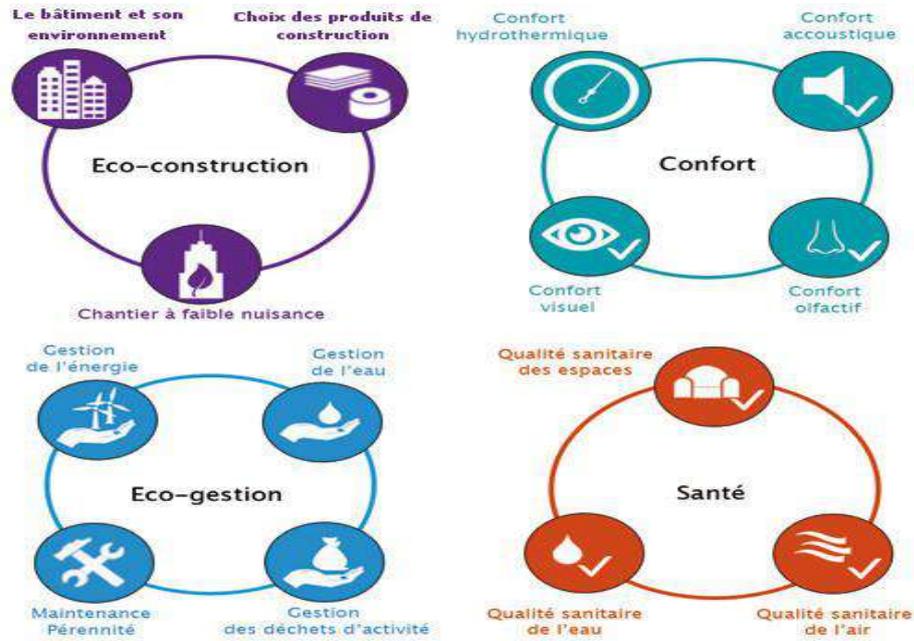


Fig.1.10. Cibles de la démarche HQE (Certivéa, 2021)

1.3.7.3. Label LEED

Le label LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) est un programme de standardisation des bâtiments respectant des critères de haute qualité environnementale. C'est l'équivalent du HQE français. LEED permet d'évaluer l'impact et la performance environnementale des bâtiments. La certification LEED a pour objectif de promouvoir les bâtiments écologiques et de réduire leurs impacts environnementaux lors de leur construction et pendant leur exploitation (Écolabels, 2021a).

Le label LEED comporte de nombreuses évaluations à savoir :

- Aménagement écologique des sites
- Gestion efficace de l'eau
- Énergie et atmosphère
- Matériaux et ressources
- Qualité des environnements intérieurs
- Innovation et processus de design

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.3.7.4. Label BREEAM

Le label BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) développée par le Building Research Establishment (BRE) est un standard de référence en termes de construction durable. Il représente un équivalent du référentiel Haute Qualité Environnementale (HQE) en France et de l'américain LEED. Il intègre une méthode d'évaluation des performances environnementales d'un bâtiment. BREEAM est un programme volontaire de certification qui s'applique à divers types de projets et classe les impacts des bâtiments sur l'environnement (Écolabels, 2021b).

Le référentiel BREEAM présente différentes versions en fonction des régions. Le référentiel comprend :

- 10 catégories de problématiques environnementales : gestion, bien-être et santé, énergie, transport, matériaux, eau, déchets, paysage et écologie, pollution et innovation.
- Un système de pondération de ces catégories.
- Des outils d'évaluation de méthodes, produits et matériaux de construction.
- Une référence aux codes et standards locaux.

1.3.7.5. BCA Green Mark

Le programme de certification Green Mark a été lancé par Building and Construction Authority (BCA) en janvier 2005. Il s'agit d'un système d'évaluation des bâtiments écologiques conçu pour évaluer l'impact environnemental et les performances d'un bâtiment. Il fournit un cadre complet pour évaluer la performance environnementale globale des bâtiments neufs et existants afin de promouvoir une conception durable et les meilleures pratiques en matière de construction et d'exploitation des bâtiments sur la base des critères clés suivants :

- Efficacité énergétique
- Efficacité de l'eau
- Protection environnementale
- Qualité de l'environnement intérieur
- Autres caractéristiques vertes et innovation

Le programme comporte quatre niveaux de certification, à savoir : Certified, Gold, GoldPlus et Platinum (Poduval, 2014).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.3.7.6. Label BBC-Effinergie

Le label BBC-Effinergie a été créé par l'association Effinergie, dans le but d'améliorer la performance des bâtiments neufs et d'identifier ceux ayant des performances supérieures aux niveaux réglementaires. Ce label existe pour les constructions résidentielles neuves ainsi que pour les bâtiments à usages autres que d'habitation avec des exigences différentes.

Un nouveau label BBC-Effinergie Rénovation a été créé en septembre 2021 et remplace l'ancien label avec une approche élargie incluant d'autres thématiques clefs, comme l'adaptation au changement climatique qui fait son apparition afin de rendre les bâtiments plus confortables en périodes estivales (AP-10, 2021).

1.3.8. Normes de performance énergétique

Pour développer la performance énergétique d'un bâtiment neuf ou améliorer la performance énergétique d'un bâtiment existant, nous devrions, en principe, respecter les normes de performance énergétique des bâtiments (Cadiergues, 2015). La norme permet de deux types d'évaluation énergétique des bâtiments :

- Une évaluation calculée, incluant les consommations liées au chauffage, au refroidissement, à la ventilation, à l'eau chaude sanitaire et à l'éclairage ;
- Une évaluation mesurée, définie dans un article spécifique de la norme.

Voici quelques normes de performance énergétique des bâtiments les plus connues :

- **NF EN 832** (août 1999) : Performance thermique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage - Bâtiments résidentiels.
- **NF EN ISO 10077-1** (décembre 2000) : Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures - Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 1 : méthode simplifiée.
- **NF EN ISO 10077-2** (Juin 2004) : Performance thermique des fenêtres, portes et fermetures - Calcul du coefficient de transmission thermique - Partie 2 : méthode numérique pour les profilés de menuiserie.
- **NF EN 13363-1+A1** (Décembre 2007) : Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages - Calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse - Partie 1 : méthode simplifiée.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

- **NF EN ISO 13789** (avril 2008) : Performance thermique des bâtiments - Coefficient de transfert thermique par transmission et par renouvellement d'air - Méthode de calcul.
- **NF EN ISO 13790** (novembre 2004) : Performance thermique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage des locaux.
- **NF EN ISO 13791** (juillet 2005) : Performance thermique des bâtiments - Température intérieure en été d'un local non climatisé - Critères généraux et méthodes de calcul.
- **NF EN ISO 13792** (octobre 2005) : Performance thermique des bâtiments - Calcul des températures intérieures en été d'un local sans dispositif de refroidissement mécanique - Méthodes simplifiées.
- **NF EN 13947** (août 2008) : Performances thermiques des façades légères - Calcul du coefficient de transmission thermique.
- **NF EN 15193** (novembre 2007) : Performance énergétique des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage.

1.4. Confort thermique

Le confort thermique est un aspect important du processus de conception d'un bâtiment, car l'homme moderne passe la majeure partie de la journée à l'intérieur. La norme ASHRAE-55 (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) définit le confort thermique comme "l'état d'esprit, qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique" (ASHRAE, 2017). Une définition rapidement comprise et largement acceptée, mais difficile à saisir dans les paramètres physiques (Van Hoof et al., 2010).

En raison de sa subjectivité, le confort thermique est différent pour chaque individu. Il est maintenu lorsque la chaleur générée par le métabolisme humain est autorisée à se dissiper à un taux qui maintient l'équilibre thermique dans le corps. Tout gain ou perte de chaleur au-delà génère un inconfort important. Essentiellement, pour maintenir le confort thermique, la chaleur produite doit être égale à la chaleur perdue. Selon Taleghani et al. (Taleghani et al., 2013), il y a trois raisons de comprendre l'importance du confort thermique :

1. Pour fournir une condition satisfaisante pour les personnes ;
2. Pour maîtriser la consommation d'énergie ;

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

3. Proposer et établir des normes.

1.4.1. Notion de confort thermique

La notion de confort thermique, désigne l'ensemble des interactions entre l'occupant et son environnement. La notion de confort est alors difficile à définir. Elle est sujette à de nombreuses recherches dans de multiples disciplines telles que la physique, le génie mécanique, l'architecture, la biologie et la psychologie. Plusieurs aspects sont associés (Batier, 2016) :

- **Aspect physique** : L'homme est représenté comme une machine thermique et on considère ses interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.
- **Aspect psychologique** : Il concerne les sensations de confort éprouvées par l'homme et la qualification des ambiances intérieures.
- **Aspect physiologique** : Les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont un niveau d'activité minimale.
- **Aspect sensoriel** : État d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement. L'individu ne peut pas dire s'il veut avoir plus froid ou plus chaud.
- **Aspects physio-sensoriel** : Sensation de bien-être physique et mental total.

1.4.2. Échanges thermiques du corps humain avec son environnement

Le corps humain est un système ouvert en interaction permanente avec son environnement à travers des échanges cutanés et respiratoires (Fig.1.11). L'interprétation mathématique du bilan énergétique du corps humain combine des approches analytiques et empiriques pour décrire les échanges thermiques avec l'environnement. La théorie fondamentale du transfert de chaleur est utilisée pour décrire les divers mécanismes d'échange de chaleur sensible et latente et des expressions empiriques sont utilisées pour déterminer les valeurs des coefficients des taux d'échange de chaleur. Des équations empiriques sont également utilisées pour décrire les mécanismes de régulation thermo-physiologique en fonction de la température interne du corps et la température cutanée.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

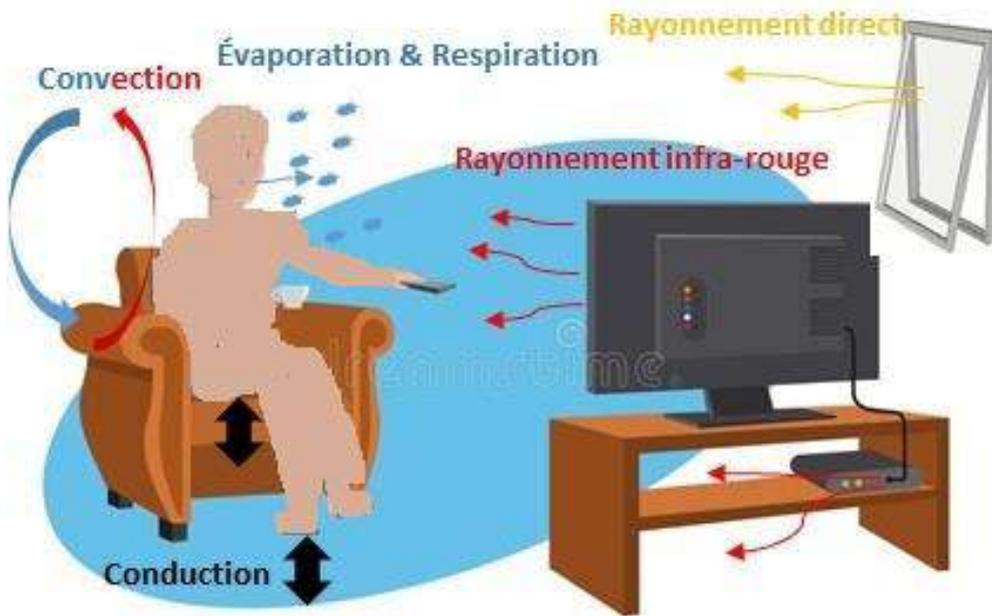


Fig.1.11. Interaction thermique entre le corps humain et son environnement (Benzaama, 2017)

1.4.2.1. Bilan thermique

Le maintien de la température interne du corps humain dans la plage normale entre 36.2 °C et 37.6 °C d'environ, nécessite un équilibre thermique avec son environnement. Le bilan thermique du corps humain s'écrit (ASHRAE, 2017):

$$M - W = Q_{skin} + Q_{respiration} + S$$

$$= (K + C + R + E_{skin}) + (C_{respiration} + E_{respiration}) + (S_{skin} + S_{core}) \quad (1.1)$$

Avec :

M : est le taux de chaleur métabolique produite en W/m²

W : est le taux de travail mécanique accompli en W/m²

Q_{skin} : est le taux total de chaleur perdue à la surface de la peau en W/m²

$Q_{respiration}$: est le taux total de chaleur perdue par la respiration en W/m²

K : est le taux de chaleur perdue par conduction à la surface de la peau en W/m²

C : est le taux de chaleur perdue par convection à la surface de la peau en W/m²

R : est le taux de chaleur perdue par rayonnement à la surface de la peau en W/m²

E_{skin} : est le taux total de chaleur perdue par évaporation à la surface de la peau en W/m²

$C_{respiration}$: est le taux de chaleur perdue par convection respiratoire en W/m²

$E_{respiration}$: est le taux de chaleur perdue par évaporation respiratoire en W/m²

S_{skin} : est le taux de chaleur stockée dans la peau en W/m²

S_{core} : est le taux de chaleur stockée dans le centre du corps en W/m²

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.2.2. Échanges de chaleur sensible

a) Échanges de chaleur par conduction

Les échanges thermiques par conduction interviennent par contact direct entre une partie du corps et une surface de température différente (les parois, le sol, ou les mobiliers) (Fig.1.12). Les propriétés thermo-physiques (Conductivité thermique, masse volumique et capacité calorifique) interviennent dans ce mode d'échange thermique. La diffusivité (a) donne une information importante sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1.2)$$

Avec :

a : est la diffusivité thermique, exprimée en m^2s^{-1}

λ : est la conductivité thermique du matériau en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

ρ : est la masse volumique en kg/m^3

C_p : est la capacité thermique massique à pression constante en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

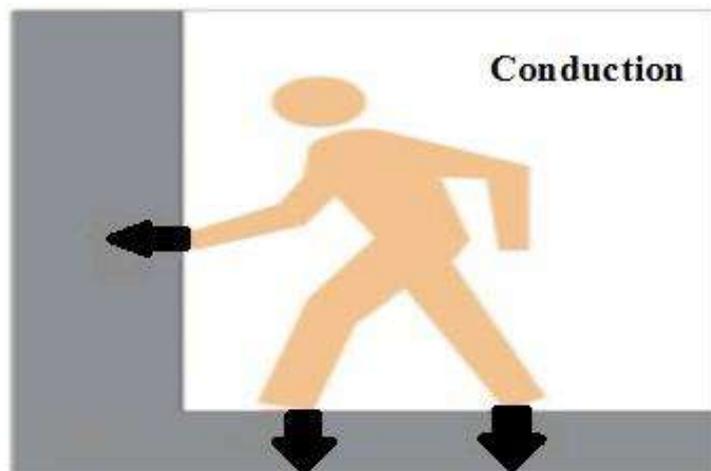


Fig.1.12. Échanges thermiques par conduction (Moujalled, 2007)

b) Échanges de chaleur par convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant (Fig.1.13). Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement, en cas de convection naturelle. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps et s'élève pour former un contour de panache au-dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

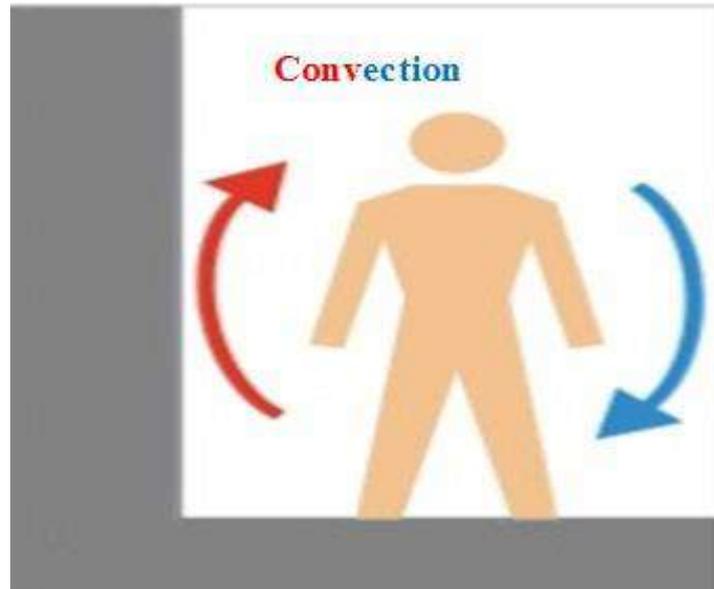


Fig.1.13. Échanges thermiques par convection (Moujalled, 2007)

L'échange convectif dépend de la différence entre la température d'air et celle du corps, peau ou vêtement, et du mouvement de l'air autour du corps. Il est calculé par l'expression suivante (ASHRAE, 2017).

$$C = f_{clothes} h_c (T_{clothes} - T_{air}) \quad (1.3)$$

Avec :

C : est le flux de chaleur convectif en W/m^2

$f_{clothes}$: est le facteur d'habillement

h_c : est coefficient d'échange convectif en $W/m^2.K$

$T_{clothes}$: est la température de la surface externe du vêtement en $^{\circ}C$

T_{air} : est la température d'air en $^{\circ}C$

c) Échanges de chaleur par rayonnement

L'échange par rayonnement est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques (Fig.1.14). Il existe deux rayonnements qui peuvent être pris en compte lors des échanges de chaleur entre l'homme et son environnement : le rayonnement infrarouge provenant des parois et des objets et le rayonnement solaire qui réchauffe les parois des bâtiments.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

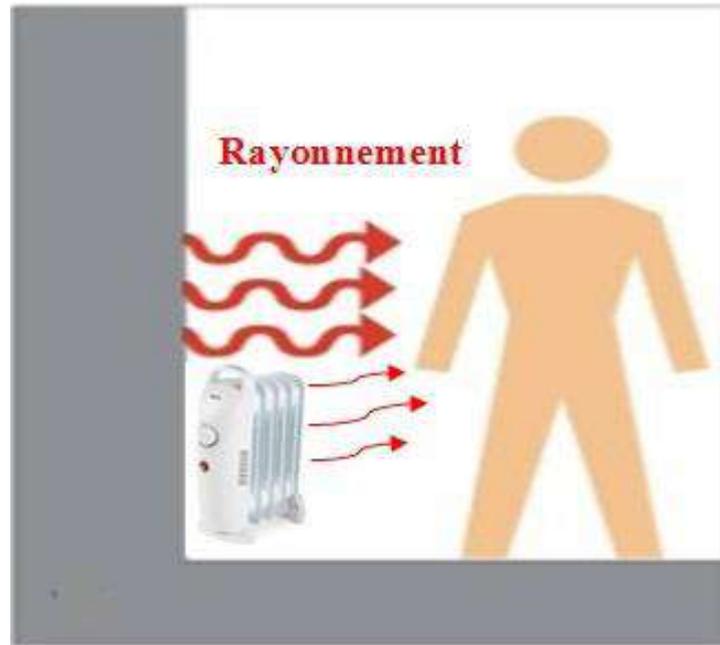


Fig.1.14. Échanges thermiques par rayonnement (Moujalled, 2007)

Pour simplifier le calcul du flux radiatif, la température moyenne de rayonnement est utilisée à condition que l'environnement thermique soit homogène. Elle est une moyenne pondérée des températures de surface des parois du local en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au sujet. En plus, une approximation linéaire est utilisée pour écrire l'équation du flux radiatif en raison des faibles écarts de température. L'expression est la suivante (ASHRAE, 2017).

$$R = f_{clothes} h_r (T_{clothes} - \bar{T}_r) \quad (1.4)$$

$$h_r = 4\varepsilon\sigma f_{effectif} \left[273.25 + \frac{T_{clothes} + \bar{T}_r}{2} \right]^3 \quad (1.5)$$

Avec :

R : est le flux de chaleur radiatif en W/m^2

$f_{clothes}$: est le facteur d'habillement

h_r : est le coefficient d'échange radiatif linéarisé en $W/m^2.K$

$T_{clothes}$: est la température de la surface externe du vêtement en $^{\circ}C$

\bar{T}_r : est la température radiante moyenne en $^{\circ}C$

ε : est l'émissivité moyenne du corps

σ : est la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

$f_{effectif}$: est le coefficient effectif de surface rayonnante

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.2.3. Échanges de chaleur latente

a) Échanges de chaleur par évaporation

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur latente dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen essentiel pour évacuer la chaleur dans les conditions chaudes par évaporation de la sueur à la surface de la peau (Fig.1.15).

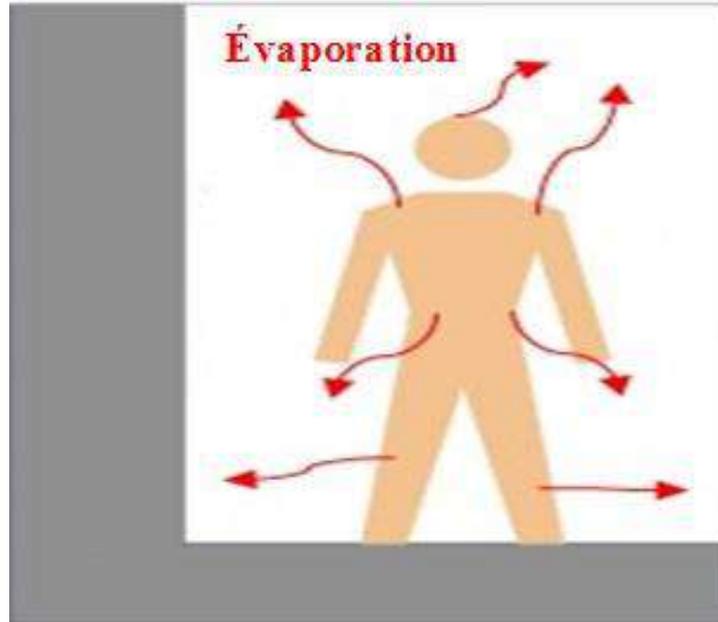


Fig.1.15. Échanges thermiques par évaporation (Moujalled, 2007)

La perte de chaleur par évaporation de la peau dépend de la quantité d'humidité sur la peau et de la différence entre la pression de vapeur d'eau au niveau de la peau et dans l'environnement ambiant (ASHRAE, 2017) :

$$E_{skin} = \frac{\omega(p_{skin,s} - p_a)}{R_{evaporation, clothes} + 1 / (f_{clothes} h_{evaporation})} \quad (1.6)$$

Avec :

E_{skin} : Chaleur perdue par évaporation à la surface de la peau en W/m²

ω : Mouillure de la peau

$p_{skin,s}$: Pression de vapeur à la surface de la peau en kPa

p_a : Pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant en kPa

$R_{evaporation, clothes}$: Résistance au transfert de chaleur par évaporation de la couche vestimentaire (similaire à $R_{clothes}$) en m²·kPa/W

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

$h_{evaporation}$: Coefficient de transfert de chaleur par évaporation (similaire à h_c) en $W/m^2 \cdot kPa$

b) Échanges de chaleur par respiration

Pendant la respiration, le corps échange à la fois de la chaleur sensible et latente par convection et évaporation avec l'air inhalé. Une quantité importante de chaleur peut être associée à la respiration, car l'air est inspiré aux conditions ambiantes et expiré presque saturé à une température légèrement plus froide que la température interne du corps (Fig.1.16).

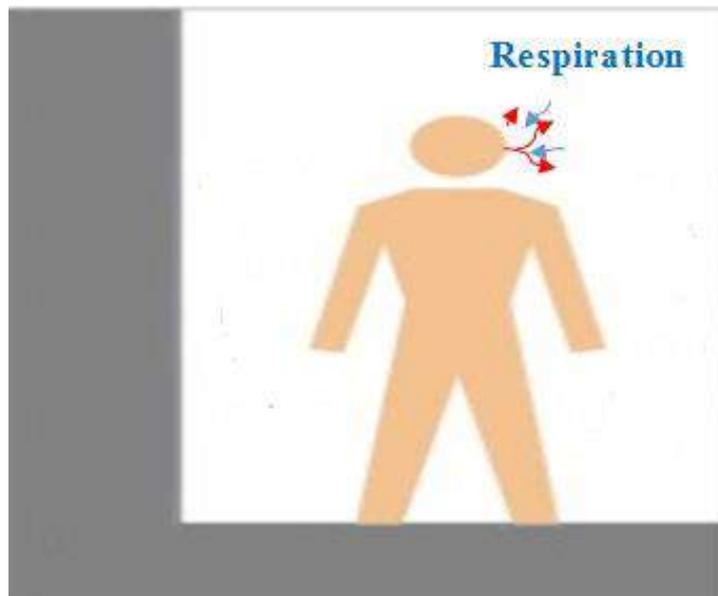


Fig.1.16. Échanges thermiques par respiration (Moujalled, 2007)

Les pertes totales de chaleur et d'humidité par la respiration sont données par l'équation suivante (ASHRAE, 2017) :

$$Q_{respiration} = C_{respiration} + E_{respiration} = 0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - p_a) \quad (1.7)$$

Avec :

$Q_{respiration}$: Taux total de chaleur perdue par respiration en W/m^2

$C_{respiration}$: Flux de chaleur perdue par convection respiratoire en W/m^2

$E_{respiration}$: Flux de chaleur perdue par évaporation respiratoire en W/m^2

M : Taux de chaleur métabolique en W/m^2

T_a : Température de l'air ambiant en $^{\circ}C$

p_a : Pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant en kPa

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.3. Paramètres effectuant le confort thermique

Le confort qui doit garantir un équilibre entre le corps humain et un environnement thermique idéal, ni trop froid ni trop chaud, dépend de plusieurs facteurs liés à l'individu et à l'environnement. La norme ASHRAE Standard-55 définit une zone de confort basée sur six paramètres qui sont :

1. La température de l'air ambiant
2. La température due au rayonnement des parois
3. L'humidité relative de l'air
4. La vitesse d'écoulement de l'air
5. Le métabolisme des individus dépendant de leur activité
6. Le degré d'isolement des vêtements portés

La diffusion de chaleur entre l'individu et l'environnement s'effectue selon divers mécanismes (Fig.1.17) :

- Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau).
- Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par conduction sont négligeables ($< 1\%$).
- Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

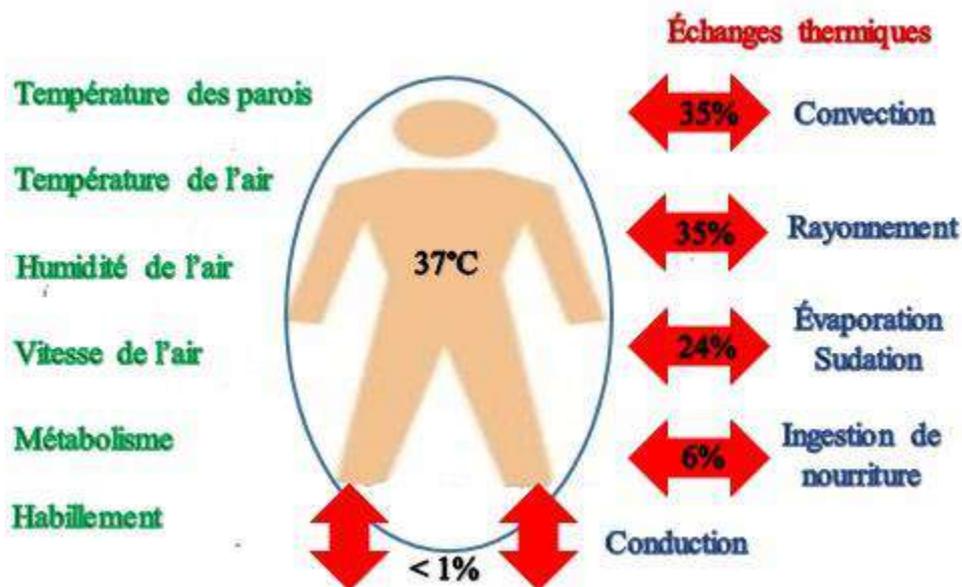


Fig.1.17. Bilan thermique du corps humain (NOEL, 2018)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.3.1. Paramètres liés à l'ambiance extérieure

a) Température de l'air

La température ambiante est la variable environnementale la plus importante qui affecte le confort thermique. D'une manière générale, pour évaluer le confort thermique dans un bâtiment, la température de l'air ambiant est combinée à d'autres paramètres climatiques tels que : l'humidité de l'air et la vitesse de l'air. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges conductifs, convectifs et respiratoires. La température ambiante modifie la sensation de chaleur, lorsque le niveau d'humidité est élevé et que la vitesse de l'air est faible, la sensation d'humidité de la peau augmente également avec la température ambiante (ASHRAE, 2017).

b) Température des parois

La température des parois est un indicateur important du confort intérieur de la pièce, car c'est cette dernière qui donne une idée de la nature de l'isolation ou de l'inertie thermique des murs. Ainsi, un mur non isolé a souvent une température radiante très basse par rapport à la température de l'air ambiant, ce qui entraîne souvent un inconfort dû à la différence de température (ASHRAE, 2017).

c) Humidité relative de l'air

C'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air à la température "T" et à la pression "p" et la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir (saturation) à la même température et pression. Elle est aussi représentée par le rapport en pourcentage de la tension de vapeur « e' » observée et la tension de vapeur saturante « e_w » par rapport à l'eau, à la même pression et à la même température (OMM, 2014) :

$$HR(\%) = 100 \left(\frac{e'}{e_w} \right)_{p,T} \quad (1.8)$$

Les variations de la température influencent directement sur l'humidité relative, de sorte que l'humidité relative baisse quand la température s'élève et augmente lorsque la température baisse. (Tableau 1.5).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Tableau.1.5. Quantité de vapeur d'eau saturante dans l'air selon sa température (OMM, 2014)

Température en °C	Masse (g) de vapeur d'eau dans 1 m ³ d'air saturé
0	4.5
3	6.0
6	7.2
9	8.8
12	10.6
15	12.7
18	15.2
21	18.2
24	21.6
27	25.2
30	30.1
33	35.3
36	41.3
39	48.2
42	56.0
45	64.8

La plage de confort est suffisamment large, de 30 % d'humidité relative à 70 %, de sorte que l'humidité dans les climats chauds est rarement un facteur déterminant du confort thermique (Bornarel, 2014).

d) Vitesse de l'air

La vitesse de l'air favorise l'évapotranspiration et les échanges thermiques par convection. Ce faisant, la vitesse d'air abaisse la température de surface, ce qui est intéressant en été, mais gênant en hiver. Cet effet n'est vraiment sensible qu'au-dessus d'une vitesse de 0,20 m/s (Bornarel, 2014). Cependant, ces vitesses à l'intérieur des bâtiments restent limitées, et ne dépassent généralement pas cette vitesse, sauf si le bâtiment ou le système de ventilation est mal conçu.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.3.2. Paramètres liés à l'individu

a) Métabolisme

Le corps humain, comme une machine thermique, produit de la chaleur interne pour maintenir la température autour de 37 °C. À ce métabolisme de base de l'organisme au repos s'ajoute un métabolisme correspondant au niveau d'activité de l'individu. On définit le MET (Metabolic Equivalent of Task en anglais) comme le rapport de l'activité sur la demande du métabolisme de base. Plus l'intensité de l'activité est élevée, plus le nombre de MET est élevé. On estime à 1 MET équivaut à 58,2 W et correspond à la quantité de chaleur produite par m² de surface corporelle par une personne moyenne au repos (Environnement, 2020).

Le tableau 1.6 donne quelques ordres de grandeur de la chaleur dégagée par m² de surface corporelle en fonction de l'activité.

Tableau.1.6. Valeurs du métabolisme en fonction de l'activité réalisée (Environnement, 2020)

Activité	Production d'énergie métabolique	
	en MET	en W/m ²
Repos, Couché	0.8	45
Repos, Assis	1.0	58
Debout, Activité légère (bureau, habitation, école)	1.2	70
Debout, Activité légère (achats, laboratoire, industrie légère)	1.6	95
Debout, Activité moyenne (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	2.0	115
Activité soutenue (travail sur machine lourde, travail de garage)	3.0	175

b) Vêtue

L'habillement représente la résistance thermique de l'échange thermique entre la surface de la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps humain dans des conditions thermiques acceptables, été comme hiver (Thellier, 1999).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Le niveau d'habillement d'une personne est alors évalué à travers la définition d'un indice de vêtiture exprimé en «clo» pour *clothes* en anglais, (l'unité de vêtement, 1 clo équivaut à $0,1555 \text{ m}^2\text{°C/W}$), et qui caractérisant le coefficient de transmission de chaleur du vêtement. (Fig.1.18).

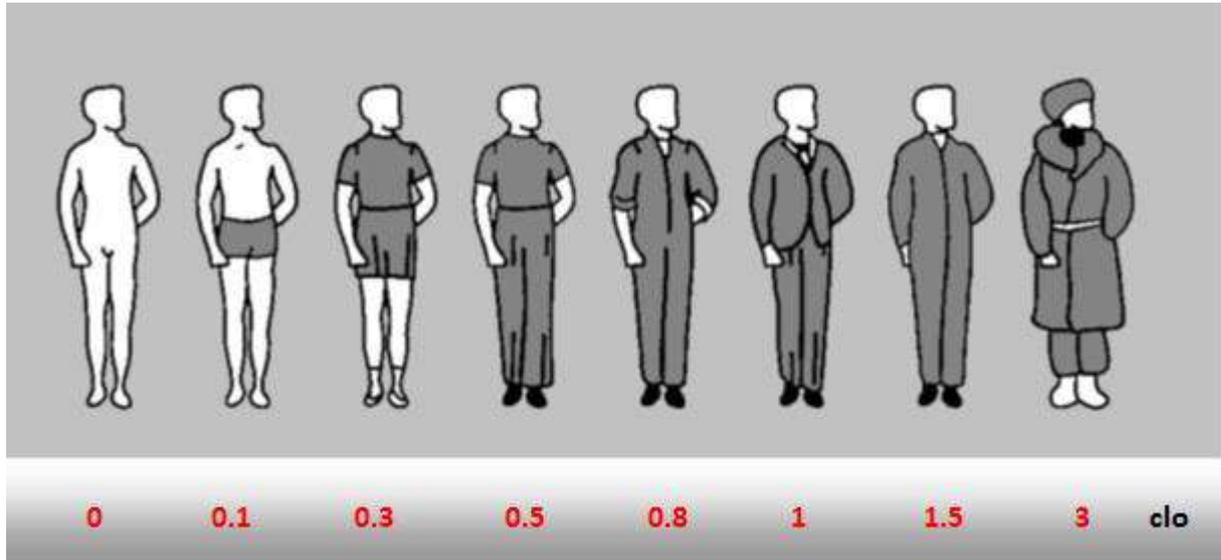


Fig.1.18. Valeurs exprimées en clo des tenues vestimentaires (Thellier, 1999)

1.4.4. Indices de confort thermique

Il existe plusieurs méthodes dites d'évaluation du confort thermique, basées sur des expérimentations menées par plusieurs chercheurs et utilisant différents critères pour déterminer le confort thermique. Plusieurs méthodes de combinaison ont été développées par les chercheurs pour le traitement simultané de variables du confort.

1.4.4.1. Indice de vote moyen prévisible (PMV)

L'indice PMV « Predicted Mean Vote », correspond à la sensation de confort basé sur l'avis moyen d'un groupe important de personnes soumises à une même ambiance thermique. Le PMV a été établi par Fanger en se référant à une échelle de sensations thermiques comportant 7 points allant de -3 à $+3$ et qui prend en compte les 6 paramètres du confort thermique (Tableau 1.7) (Fanger, 1970).

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Tableau.1.7. Échelle des sensations de confort en fonction en PMV (échelle de Fanger) (Fanger, 1970)

PMV	Sensation de confort	Avis de confort
-3	Très froid	Insatisfait parce que trop froid
-2	Froid	
-1	Légèrement froid	Satisfait (confortable)
0	Neutre	
1	Légèrement chaud	
2	Chaud	Insatisfait parce que trop chaud
3	Très chaud	

Une valeur du PMV de 0 correspond à un confort thermique optimal. La zone de confort s'étale de - 1 à + 1.

1.4.4.2. Pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD)

Le PPD «Predicted Percentage of Dissatisfied» permet d'estimer le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à l'indice PMV. Le PPD défini selon l'expression suivante :

$$PPD = 1 - 0.95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (1.9)$$

La figure 1.19 donne la correspondance entre les indices PMV et PPD.

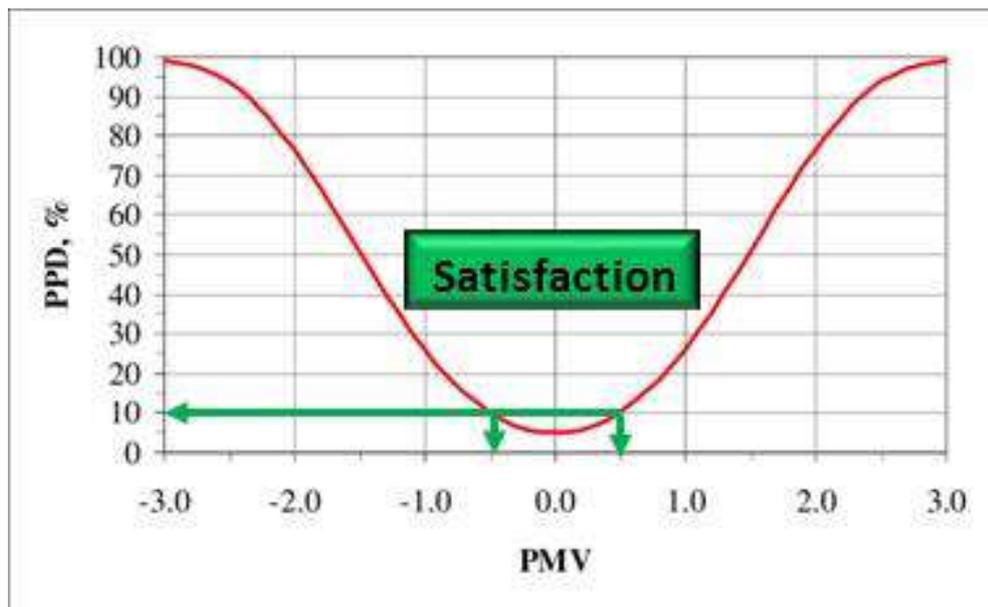


Fig.1.19. Évolution de l'indice PPD en fonction de l'indice PMV (Markov, 2002)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Un PMV compris entre -1 et $+1$ correspond à 25 % d'insatisfaits. Pour obtenir une situation de confort thermique le PPD doit être inférieur à 10 % ce qui correspond à un PMV compris entre $-0,5$ et $+0,5$ (Markov, 2002).

La norme ISO 7730 (ISO7730, 2005) stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique, il faut que :

$$-0,5 < \text{PMV} < +0,5 \text{ soit } \text{PPD} < 10 \%$$

1.4.4.3. Indice de la température effective

La Température Effective (TE) est définie comme la température d'une ambiance immobile et saturée qui, en l'absence de rayonnement, produirait le même effet que l'ambiance en question (Fig.1.20). C'est un indice arbitraire qui indique les effets combinés de l'humidité relative, de la vitesse de l'air, de la température de l'air et des vêtements. L'indice TE exige que les limites de confort doivent être établie pour chaque emplacement, zone ou région et que 22 à 27 °C sont supposées les limites de confort pour les Tropiques (Ogunsote & Prucnal-Ogunsote, 2002).

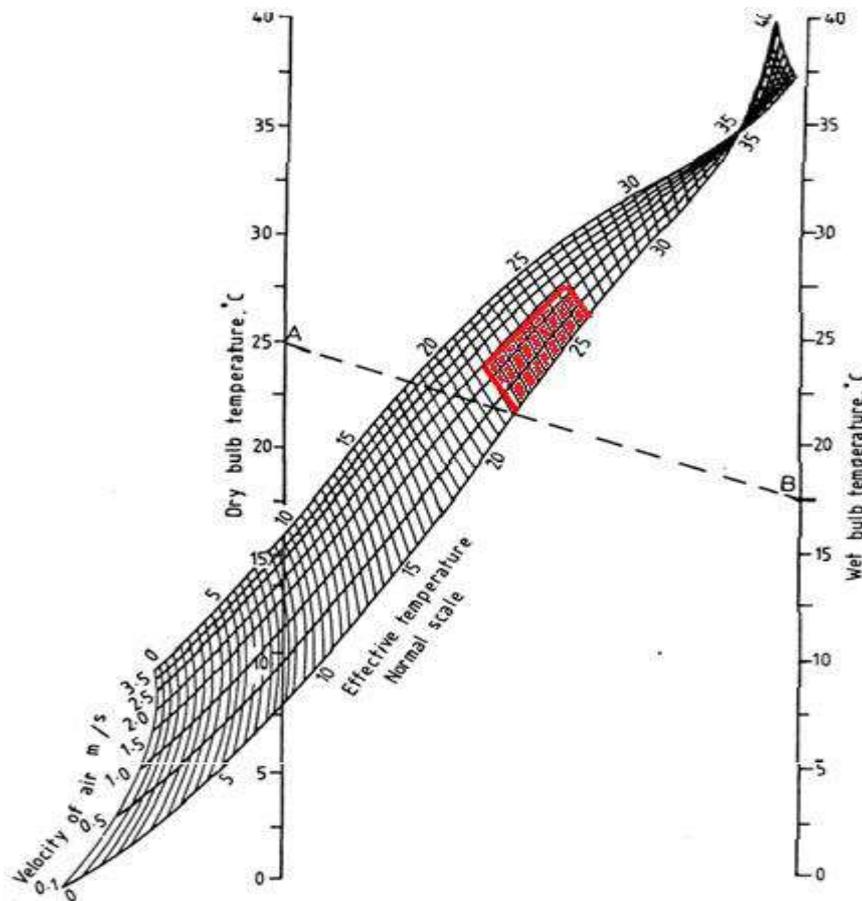


Fig.1.20. Nomogramme de la température effective (Ogunsote & Prucnal-Ogunsote, 2002)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Givoni (Givoni, 1978) montre que l'indice TE n'a pris en compte adéquatement le mouvement de l'air qu'en dessous d'une température de 32 °C. L'indice est valable pour des températures de l'air comprises entre 0 et 45 °C et vitesse de l'air entre 0,1 et 7 m/s.

1.4.4.4. Indice de la température résultante

L'indice de température résultant, développé par Missenard (1948), est basé sur l'hypothèse qu'une base plus solide pour un indice thermique sera formée par des expériences dans lesquelles l'équilibre thermique est atteint entre le corps et l'environnement. L'humidité et le vent peuvent être trouvés. Un diagramme schématisé du corps vêtu a émergé des résultats de l'expérience (Fig.1.21).

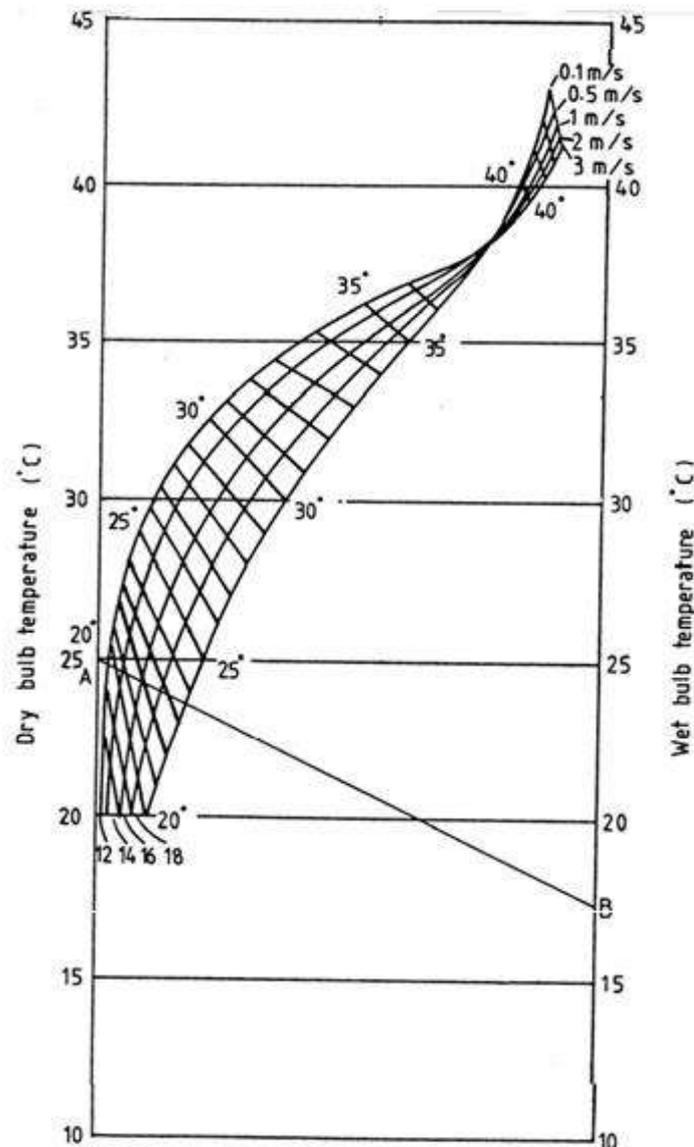


Fig.1.21. Nomogramme de la température résultante (Givoni, 1978)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

Les facteurs climatiques couverts par la température résultante est la température de l'air entre 20-45 °C, et la vitesse de l'air entre 0 et 3 m/s (Givoni, 1978).

1.4.4.5. Indice de la température efficace

Cet indice a été développé par Houghton et Yaglou (1923). Les facteurs qu'il comprend sont la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air. Deux échelles ont été développées, l'une pour les hommes dévêtus jusqu'à la taille dite « échelle de base », et l'autre pour les hommes en sous-vêtements, dite « échelle de température normale effective ». L'unité ou la base, d'une température efficace est la température de l'air saturé avec une vitesse moyenne de 0,12 m/s. On suppose que toute combinaison de température de l'air, d'humidité et de vitesse de l'air a une certaine valeur de température efficace, produire la même sensation thermique qui est éprouvé dans un air immobile saturé à la même température comme la valeur de l'indice.

1.4.4.6. Indice de la température opérative

La température opérative est un indice de confort thermique qui intègre deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Cet indice est utilisé pour estimer les effets convectifs et radiatifs sur le confort de l'individu (Givoni, 1978). La température des parois et température de l'air ambiant définissent la température opérative :

$$T_{opérative} = \frac{T_{air} + T_{parois}}{2} \quad (1.10)$$

Cette relation simple s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.

1.4.4.7. Indice de contrainte thermique

L'indice de contrainte thermique est un modèle biophysique qui décrit les mécanismes d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement, avec lequel la contrainte thermique totale exercé sur le corps (métabolisme + ambiance) peut être calculée. Au-dessus de la zone de confort, on peut également trouver le taux de transpiration nécessaire au maintien de l'équilibre thermique, tant que le corps peut rester en équilibre (avec une température rectale élevée, mais constante). Au-dessous de la zone de confort, l'indicateur

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

prend une valeur négative indiquant la présence d'une contrainte de refroidissement (Givoni, 1978).

1.4.5. Diagrammes bioclimatiques

Vu la complexité des informations et leur caractère empirique et en plus des indices thermiques, de nombreuses recherches ont été initiées pour connaître les limites du confort thermique sous forme diagrammes bioclimatiques. En 1953 le premier diagramme bioclimatique a été proposé par Olgyay. Il a été le premier à développer une procédure qui est basée sur un diagramme bioclimatique qui définit une zone de confort avec des plages d'été et d'hiver et des mesures correctives en cas de combinaison d'humidité et de température en dehors de la zone de confort.

1.4.5.1. Diagramme bioclimatique d'Olgyay

Olgyay a été le premier à approfondir la notion de confort thermique et à essayer d'établir des relations avec les ambiances intérieures des bâtiments à travers son diagramme bioclimatique, en mettant en évidence la zone du confort humain en relation avec la température d'air ambiant et l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation (B Hebbal et al., 2021). Sur ce diagramme (Fig.1.22), la température sèche se trouve en ordonnée et l'humidité relative en abscisse. La zone de confort est au centre, avec les plages d'hiver et d'été indiquées séparément (prenant en compte les adaptations saisonnières).

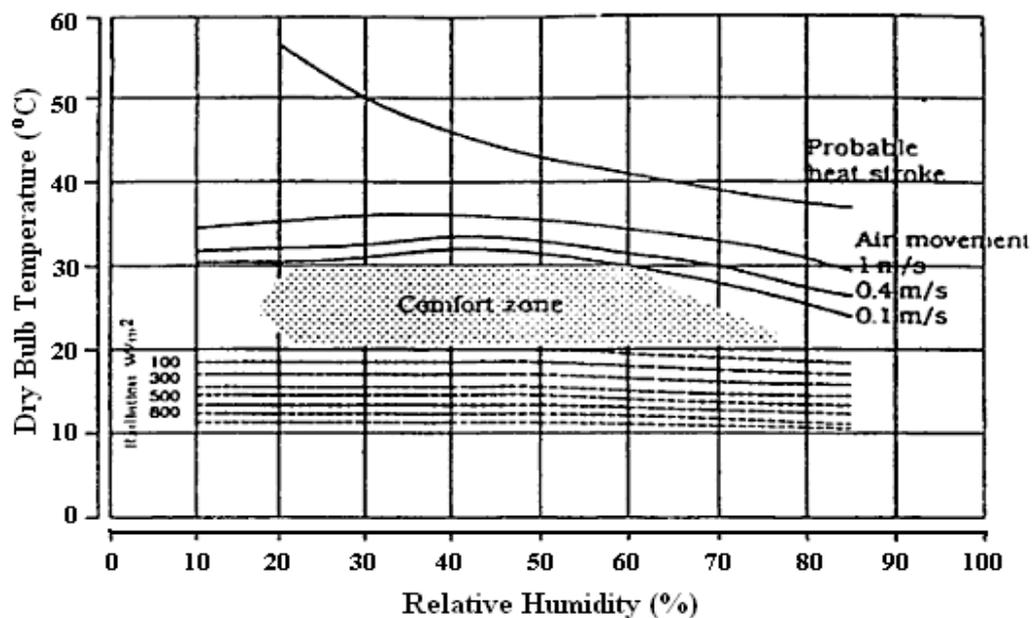


Fig.1.22. Diagramme bioclimatique d'Olgyay (B Hebbal et al., 2021)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.5.2. Diagramme bioclimatique de Givoni

S'appuyant sur les études antérieures d'Olgay, Givoni a développé une méthode empirique où il représente les limites des ambiances de confort dans le diagramme psychrométrique actuel. Il présente une méthode plus efficace que la méthode Olgay, pour évaluer les besoins physiologiques du confort (B Hebbal et al., 2021).

Givoni définit le confort en considérant une personne en état d'activité, à travers son diagramme bioclimatique, il a démontré qu'en appliquant des concepts d'architecture, l'effet de la variation climatique de l'environnement extérieur peut être réduit au minimum. La figure 1.23 montre que la zone de confort se trouve au centre du diagramme et se situe entre les températures 20 et 27 °C, c'est-à-dire qu'il considère que toutes les personnes, quelle que soit la latitude à laquelle elles se trouvent, réagissent de la même manière au confort.

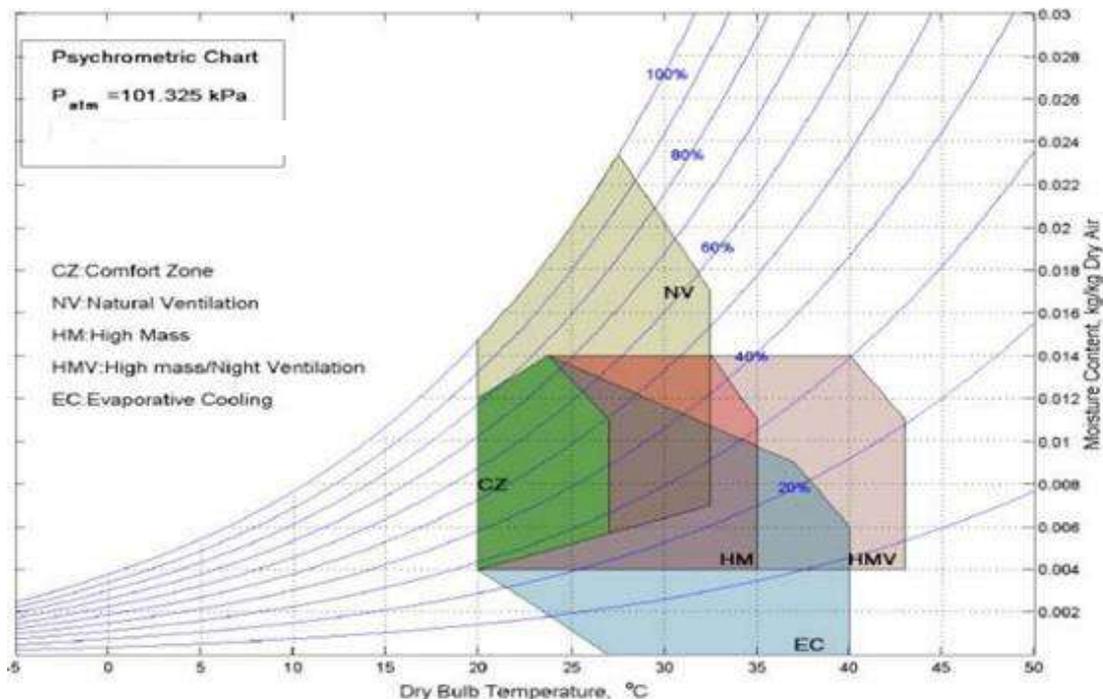


Fig.1.23. Diagramme bioclimatique de Givoni (B Hebbal et al., 2021)

1.4.5.3. Diagramme psychrométrique ASHRAE Standard 55

La norme américaine ASHRAE 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) fait partie des différents standards d'évaluation des conditions environnementales intérieures des bâtiments, son rôle est de définir les combinaisons entre l'environnement intérieur et les facteurs personnels qui engendreront les conditions thermiques acceptables pour 80 % ou plus des occupants de l'espace intérieur. La norme a

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

évolué et a introduit un nouvel aspect du confort intérieur, à savoir l'adaptation qui montre qu'au-delà des facteurs physiques, il existe d'autres éléments d'ordres psychologiques, comportementaux ou d'acclimations que pouvait avoir l'occupant influençant et garantissant son confort. Ainsi, l'approche adaptative propose une nouvelle équation d'évaluation du confort intérieur en fonction de la température extérieure comprise entre 10 °C et 33 °C (Attia & Carlucci, 2015) :

$$T_{conf} = 0.31T_0 + 17.8 \quad (1.11)$$

Avec :

T_{conf} : La température de confort (température opérative) en °C.

T_0 : La température extérieure moyenne mensuelle en °C

Les températures exprimant la neutralité thermique déterminée, une plage de température de confort a été calculée représentant une acceptabilité de 80% qui traduit un niveau de confort typique et 90% si on désire un niveau plus élevé de confort, créant respectivement une bande moyenne de 5 °C à 7 °C basée sur la relation PMV/PPD illustré dans la Figure 1.24.

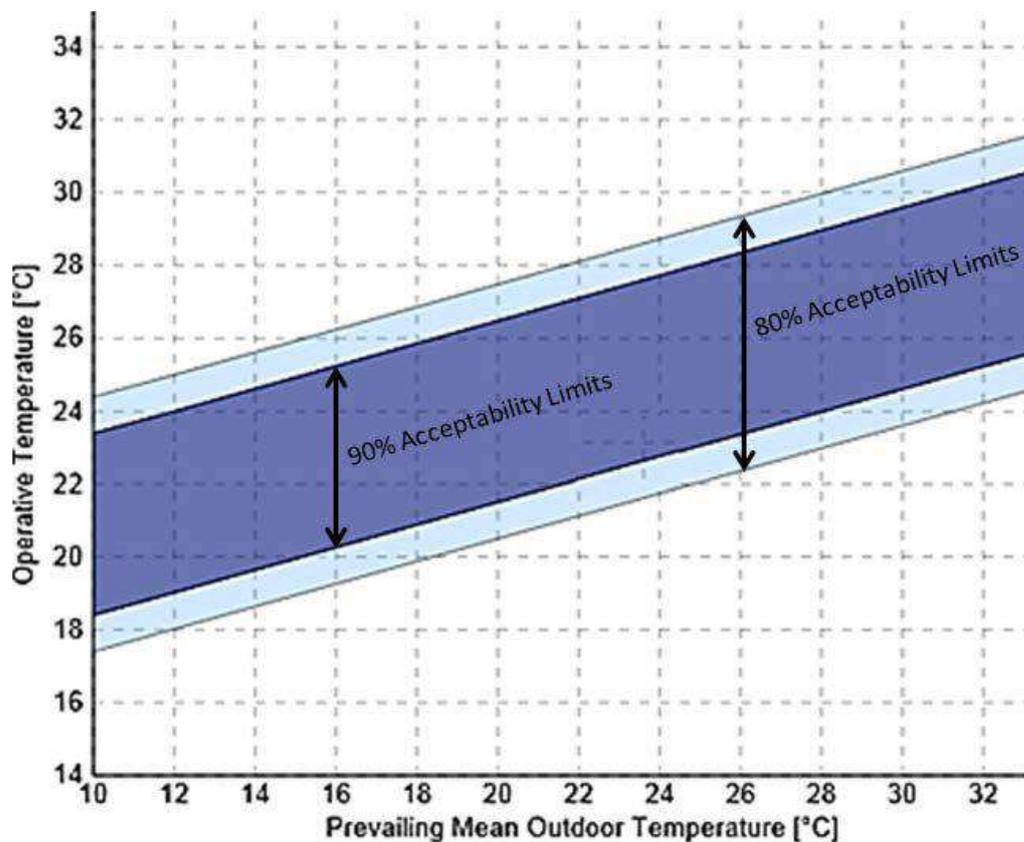


Fig.1.24. Modèle de confort adaptatif utilisé dans la norme ASHRAE 55 (Attia & Carlucci, 2015)

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.4.6. Facteurs d'inconfort thermique

Bien que le confort thermique global soit atteint, il est possible de constater des zones d'inconfort dans les bâtiments. Un environnement thermique inégal peut être une nuisance pour certaines parties du corps. L'insatisfaction thermique peut être causée par un inconfort causé par un refroidissement ou un réchauffement indésirable d'une partie du corps (tête, pieds ou mains) par l'effet du courant d'air.

Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et la cheville, avec un sol trop chaud ou trop froid, ou à une asymétrie de rayonnement thermique. Ainsi, le confort thermique peut être affecté par plusieurs facteurs, citons par exemple (Munaretto, 2014) :

- Effet des courants d'air ;
- Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique ;
- Effet de gradient thermique vertical ;
- Effet de la température du sol.

1.5. Conception bioclimatique

L'architecture bioclimatique est celle qui optimise le fonctionnement du bâtiment sur les ressources offertes par son environnement extérieur (température, soleil, lumière, air...). La conception bioclimatique est donc, une architecture qui cherche à tirer parti de l'environnement plutôt que de le subir, afin de rapprocher au maximum ses occupants des conditions de confort. Cette architecture utilisera davantage l'énergie solaire passive pour créer une ambiance intérieure confortable, car pendant les périodes froides, elle favorise les apports de chaleur gratuite, diminue les pertes de chaleur et assure un renouvellement d'air suffisant. En périodes chaudes, elle réduit les apports calorifiques et favorise le rafraîchissement (Coccolo, 2017). Donc, le choix d'une démarche de conception bioclimatique favorise les économies d'énergies et permet de réduire les dépenses de chauffage et de climatisation, tout en bénéficiant des ambiances intérieures confortables.

1.5.1. Principes de base de la conception bioclimatique

L'objectif principal de la conception bioclimatique est d'obtenir le confort d'ambiance recherché de manière la plus naturelle possible en utilisant les moyens architecturaux, les énergies renouvelables disponibles et en utilisant le moins possible les

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

moyens techniques mécanisés et les énergies extérieures au site. Ces stratégies et techniques architecturales cherchent à profiter au maximum du soleil en hiver et de s'en protéger durant l'été (Coccolo, 2017). C'est pour cela que l'on parle également d'architecture « solaire » ou « passive ».

1.5.1.1. Localisation du bâtiment

Le choix d'implantation d'un bâtiment influence directement sur le degré de confort thermique que ce dernier peut procurer à ses occupants, à cause de l'incidence du soleil, des vents dominants sur son enveloppe et de sa situation dans son environnement (Environnement, 2020).

Une bonne implantation cherche à profiter au maximum de :

- La protection naturelle du vent et du soleil d'été par la topographie du terrain naturel et la végétation existante ;
- Ensoleillement hivernal en évitant les masques portés par la végétation, le relief et l'environnement bâti.

1.5.1.2. Orientation du bâtiment

Le choix d'une orientation est soumis d'après Givoni (Givoni, 1978) à de nombreuses considérations, telles que la position du bâtiment par rapport aux voies, la topographie du site, le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement, ainsi que la ventilation en rapport avec la direction des vents dominants. Il place le concept de l'orientation au centre des éléments influant sur les ambiances intérieures d'un bâtiment.

L'ensoleillement est en très grande partie responsable de divers effets sur les bâtiments. Il peut être considéré en même temps comme source d'énergie gratuite en hiver et cause d'inconfort thermique en été. En outre une bonne orientation est celle qui permet l'exploitation du vent qui peut être bénéfique en été (ventilation naturelle) et préjudiciable en hiver.

1.5.1.3. Forme ou la compacité du bâtiment

La compacité d'un bâtiment ou le coefficient de forme est défini comme le rapport entre la surface de déperdition de l'enveloppe extérieure en m^2 et le volume habitable en m^3 . Il indique le degré d'exposition du bâtiment aux conditions climatiques ambiantes. Plus la surface de déperditions est petite, plus les pertes de chaleur diminuent, le bâtiment est plus

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

économique en énergie quand le coefficient de forme prend des valeurs plus faibles (chauffer le même volume, mais avec moins de surfaces de déperditions) (IBGE, 2007).

1.5.1.4. Organisation intérieure du bâtiment

L'occupation des différents espaces du bâtiment varie en fonction de la fréquence des jours et même des saisons. L'identification de ces différents espaces (zones) et la caractérisation de leurs besoins thermiques permet de les arranger rationnellement les uns par rapport aux autres. Les zones habitées en permanence, de jour comme de nuit, celles qui nécessitent plus de chaleur en hiver, sont séparées de l'extérieur par des espaces intermédiaires qui jouent le rôle de transition et de protection thermique (IBGE, 2007).

La hiérarchie des espaces assure la transition entre l'extérieur et l'intérieur. Les espaces intérieurs sont organisés en fonction de l'usage, de sorte que l'ambiance thermique corresponde aux activités et aux heures d'utilisation, c'est-à-dire qu'il est rarement utilisé, mais joue un rôle protecteur contre le froid. Pour optimiser l'approche thermique du bâtiment, l'idéal est d'organiser le bâtiment, dès la première formule spatiale du bâtiment, en fonction de leurs besoins.

1.5.1.5. Protection solaire

Les protections solaires ont un rôle essentiel à jouer pour éviter que tout ou seulement une partie du rayonnement solaire ne pénètre dans le bâtiment à travers une ouverture. La conception d'une protection solaire efficace est fondamentale pour qu'un bâtiment soit thermiquement et énergétiquement performant, par contre l'architecture moderne est caractérisée par l'usage largement répandu du vitrage, qui a entraîné, selon Givoni une considérable évolution des rapports entre les ambiances intérieures et le climat extérieur.

La conception des protections solaires doit répondre à de nombreux objectifs, tels que : la réduction des surchauffes et l'éblouissement ainsi que gestion de l'éclairage naturel dans les pièces.

Il existe de nombreux types de dispositifs de protection solaire, ils peuvent être structurels, fixes (balcon, véranda, auvent) ou appliqués, mobiles (stores, persiennes, volets, etc.), extérieurs ou intérieurs, verticaux ou horizontaux. Elle peut aussi être liée à l'environnement comme la végétation. L'efficacité de la protection solaire dépend de son type, de son orientation et de la période de l'année.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

1.5.1.6. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est définie comme le mouvement de l'air qui se produit dans un endroit sans l'influence d'outils mécaniques. Le flux d'air naturel dépend des effets du vent et des changements de densité de l'air dus aux différences de température, et il est considéré comme le principe du refroidissement passif.

La ventilation est intéressante car, d'une part, elle peut apporter de la fraîcheur si l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur. D'autre part, elle permet une circulation de l'air qui améliore le confort thermique, car il augmente les échanges thermiques entre le corps et l'air ambiant par convection et évaporation de la sueur. La ventilation joue également un rôle sain en termes de qualité de l'air intérieur (Environnement, 2020).

Pour assurer une ventilation naturelle efficace, la conception du bâtiment doit tenir compte des phénomènes physiques d'écoulement d'air et de la position des ouvertures en façade.

Il existe de nombreux types de modes de ventilation naturelle dans les bâtiments, tel que : la ventilation traversante, la ventilation de simple exposition, la ventilation par tirage thermique, ...ect, où nous allons les expliquer en détail dans le deuxième chapitre.

1.5.2. Stratégies de conception bioclimatique

En hiver comme en été, l'architecture bioclimatique a développé des stratégies passives, profitant des aspects favorables de l'environnement, pour créer une ambiance intérieure confortable, deux stratégies résument l'approche bioclimatique du confort thermique.

1.5.2.1. Système de chauffage solaire passif (Confort d'hiver)

S'il est important de se protéger des surchauffes en été, il est tout aussi important de récupérer des calories en période froide pour se chauffer (Lavigne, 1998). Les principes de la stratégie de chauffage (ou systèmes de chauffage solaire passif) sont les suivants (Fig.1.25) :

1. Capter le rayonnement solaire,
2. Stocker l'énergie ainsi captée,
3. Conserver cette chaleur et éviter les déperditions dues au vent,
4. Distribuer cette chaleur dans le bâtiment.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

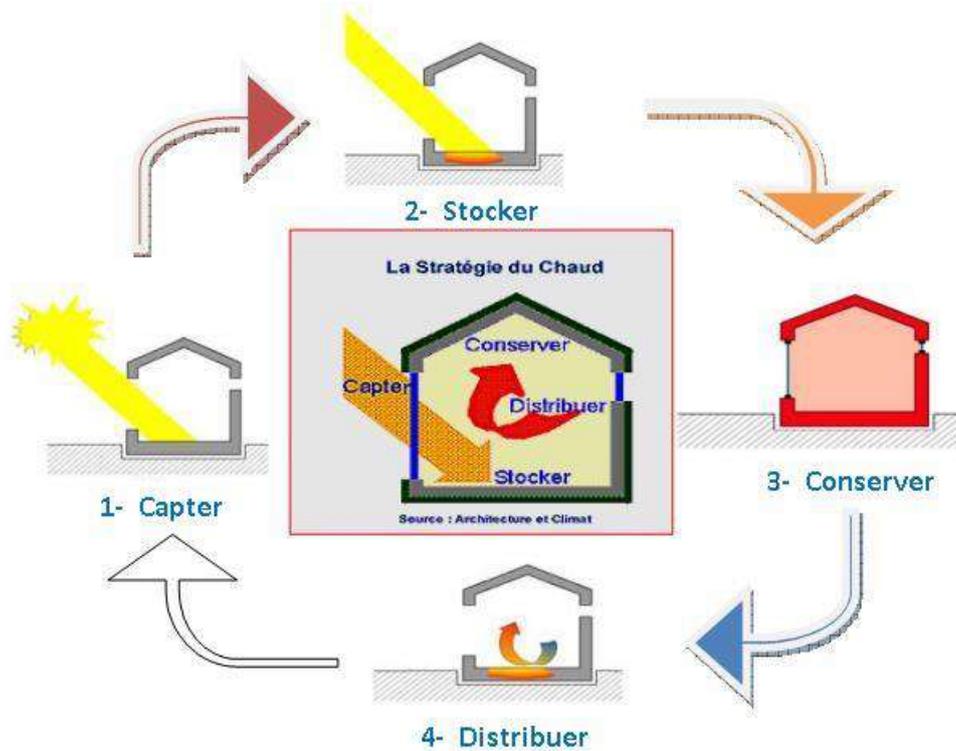


Fig.1.25. Concepts de la stratégie du chaud (Lavigne, 1998)

1.5.2.2. Système de refroidissement passif (Confort d'été)

Contrairement à l'hiver, les apports gratuits sont indésirables en saison chaude et contribuent à augmenter les besoins de rafraîchissement (Lavigne, 1998). La stratégie de refroidissement naturel répond au confort d'été. Il s'agit de (Fig.1.26) :

1. Protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur,
2. Éviter les déperditions de fraîcheur
3. Minimiser les apports internes,
4. Dissiper la chaleur en excès par la ventilation naturelle.

Chapitre 1 : Généralités sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments

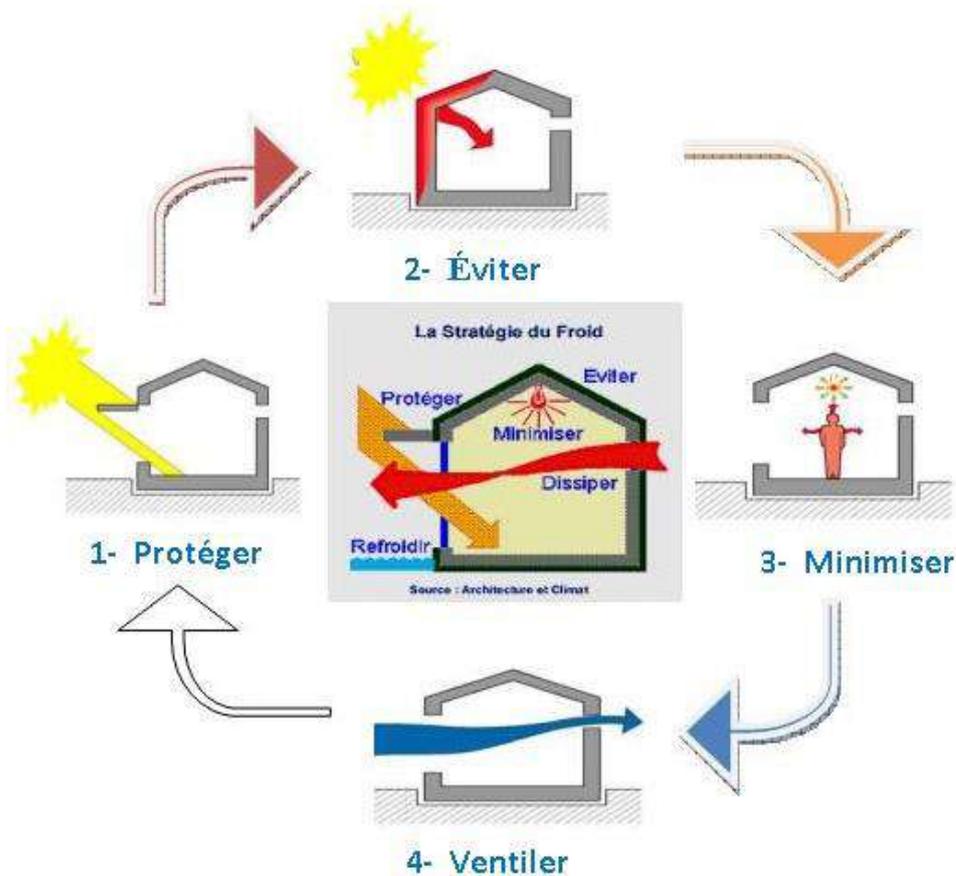


Fig.1.26. Concepts de la stratégie du froid (Lavigne, 1998)

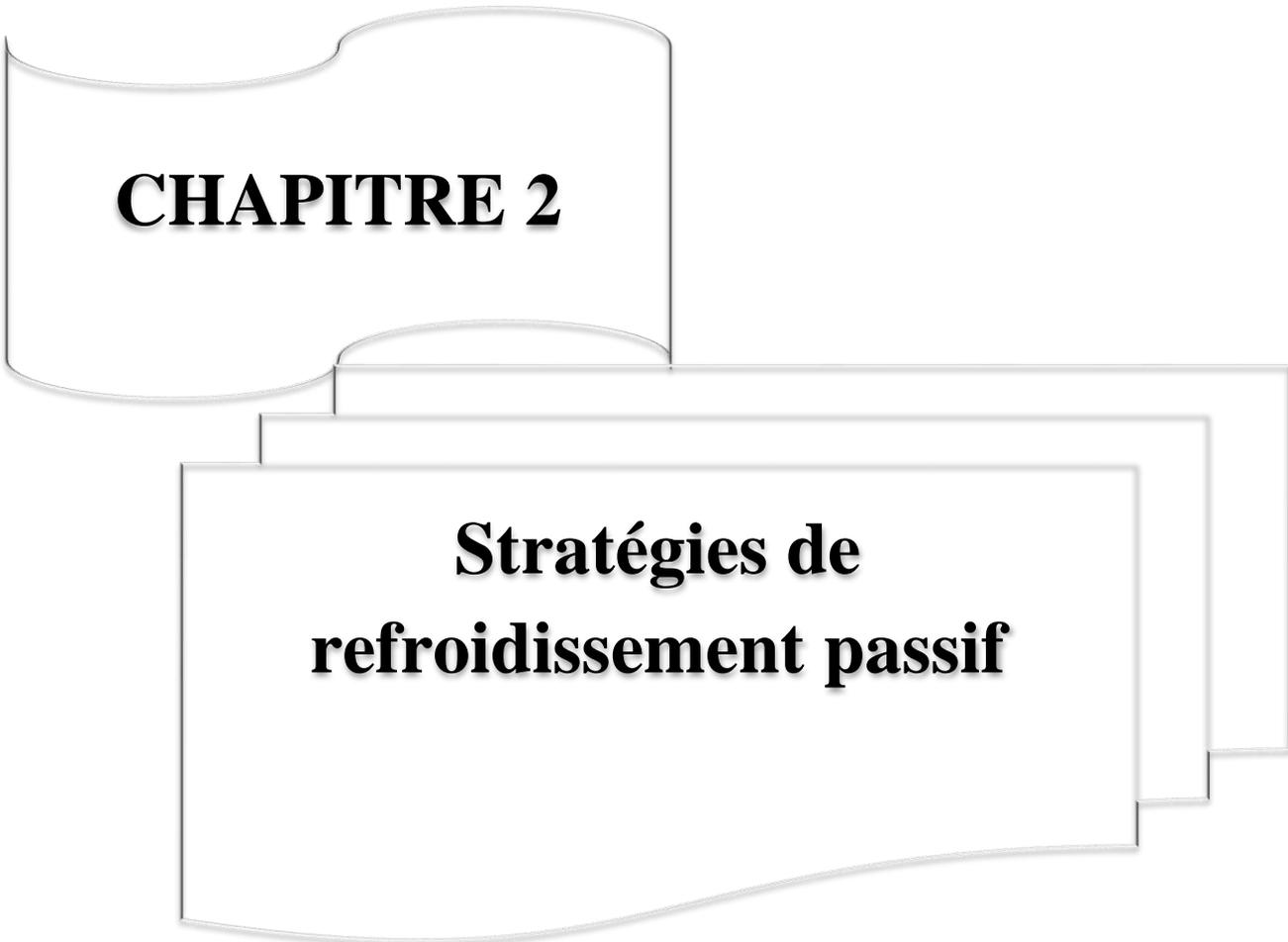
1.6. Conclusion

Partout dans le monde, le secteur résidentiel est un secteur énergivore, cela est d'autant plus vrai pour le modèle énergétique Algérien.

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur dans le secteur du bâtiment tant pour la qualité des ambiances intérieures que pour les impacts énergétiques et environnementaux dont il est responsable.

Pour situer le problème du confort thermique, nous avons analysé dans ce premier chapitre les connaissances existantes en matière de confort thermique dans le bâtiment. Cette analyse nous a permis de comprendre la complexité de ce sujet à travers sa diversité. Le modèle adaptatif a mis en relation la sensation thermique à la température extérieure afin de prévoir la température de confort.

L'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment peut prendre des différents aspects matérialisés par une multitude de techniques passive, ainsi que des solutions qui restent à défricher, ce qui fera l'objet de notre prochain chapitre.



CHAPITRE 2

**Stratégies de
refroidissement passif**

2.1. Introduction

Ces dernières années le système de refroidissement passif utilise des méthodes non mécaniques pour maintenir une température intérieure confortable afin d'obtenir les effets souhaités pour les occupants.

Les techniques de refroidissement passif peuvent réduire la charge de refroidissement de pointe dans les bâtiments, réduisant ainsi la taille de l'équipement de climatisation et la période pendant laquelle il est généralement requis. Dans notre recherche, nous nous concentrerons sur le cas du climat saharien, pour lequel les bâtiments disposent généralement d'un besoin en froid important durant l'été.

Ce chapitre est consacré à l'étude de quelques techniques de refroidissement passif comme stratégie principale pour assurer le confort d'été sans aucune forme d'apport d'énergie, autre que les sources d'énergie naturelles et renouvelables.

2.2. Principes de la stratégie de refroidissement passif

Pendant la période estivale, plus de 50% de l'énergie totale consommée par les bâtiments dans un climat chaud et sec va vers le système de refroidissement. Les bâtiments contemporains, en particulier dans ces régions ont besoin d'une énorme quantité d'énergie pour créer un environnement confortable des occupants (Ahriz et al., 2021).

La stratégie de refroidissement passif couvre l'ensemble des processus et techniques naturels de refroidissement des bâtiments. Il s'agit d'un refroidissement sans aucune forme d'apport d'énergie, autre que les sources d'énergie renouvelables. Les techniques de refroidissement passif sont également étroitement liées au confort thermique des occupants.

Il est également possible d'augmenter l'efficacité du refroidissement passif avec des techniques de transfert de chaleur assistées mécaniquement. Ces systèmes de refroidissement sont appelés « hybrides », dont la consommation d'énergie est maintenue à des niveaux très bas, mais l'efficacité des systèmes et leur applicabilité sont fortement améliorées (Geetha & Velraj, 2012). Les stratégies de rafraîchissement passif sont organisées autour de trois principes :

1. **Protection solaire** : Elle consiste à minimiser les apports de chaleur en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois.
2. **Modulation thermique** : Ce principe fait intervenir la capacité thermique du stockage des matériaux utilisés dans la construction. Le but principal est d'amortir la chaleur extérieure pénétrant dans le bâtiment.

3. **Dissipation thermique** : Elle se base essentiellement sur l'utilisation d'un environnement dont la température est plus faible pour dissiper l'excès de chaleur dans le bâtiment.

La Figure 2.1 présente la classification des stratégies passives pour le bâtiment proposée par Geetha et Velraj (Geetha & Velraj, 2012).

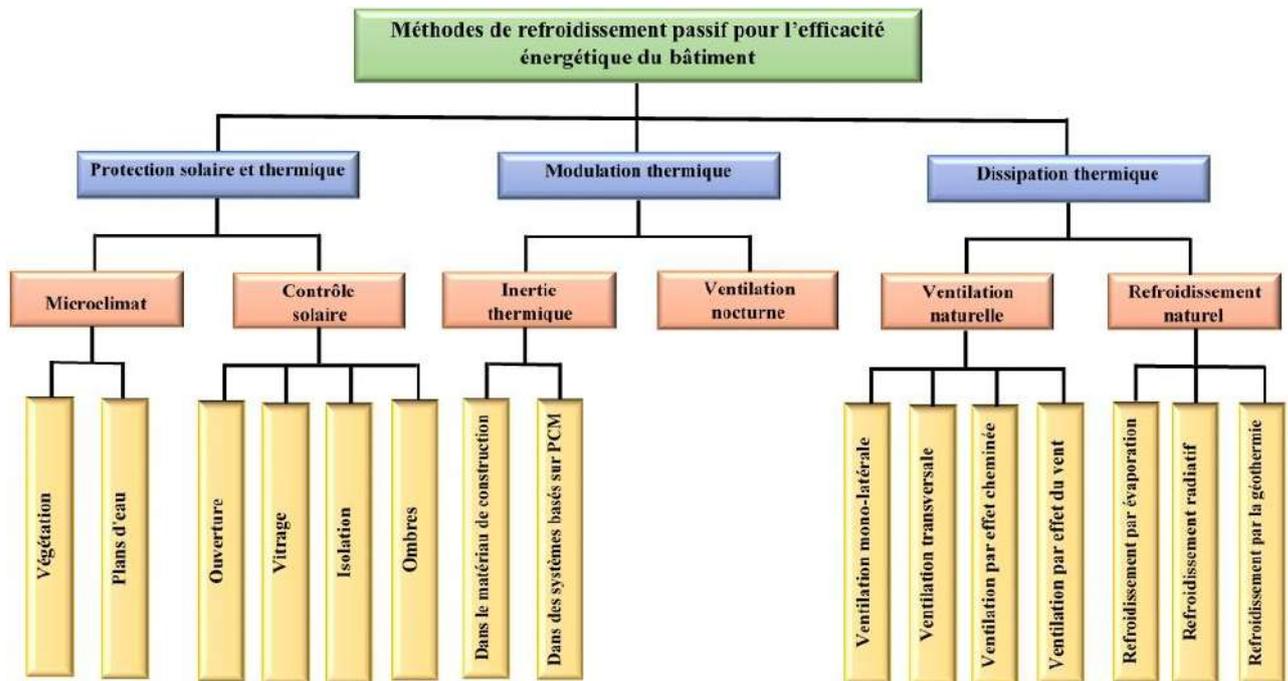


Fig. 2.1. Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie (Geetha & Velraj, 2012)

2.3. Stratégie de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle est le flux d'air entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. La ventilation naturelle provient de deux forces naturelles : les différences de pression créées par le vent autour du bâtiment (ventilation entraînée par le vent), et les différences de température (ventilation par effet de cheminée ou force thermique) (Guedes, 2013) :

- a) **Pressions dues au vent** : Lorsque le vent rencontre un obstacle tel qu'un bâtiment, il se crée dans la zone de contact une surpression due à une accumulation plus au moins rapides des molécules d'air. Si cette surface de contact présente des ouvertures, il résultera un écoulement d'air gouverné par une différence de pression entre la zone de contrat (côté au vent) et les autres surfaces du bâtiment (côté sous le vent) (Yang et al., 2012).

Chapitre 2 : Stratégies de refroidissement passif

La Figure 2.2 montre les zones de pressions positives et négatives générées par le vent normal au front du bâtiment : écoulement par le vent à travers les entrées sur les faces à pression positive et les sorties sur les faces à pression négative.

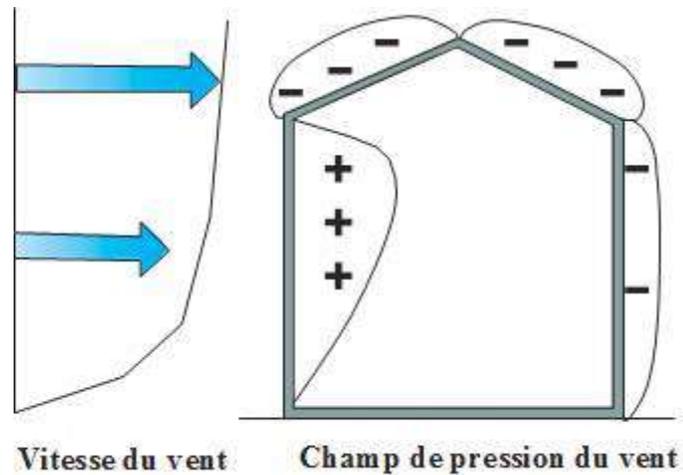


Fig. 2.2. Distribution de la pression du vent autour d'un bâtiment (Yang et al., 2012)

- b) **Effet de tirage thermique** : L'effet de tirage thermique est dû à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Lorsque l'air intérieur est plus chaud (masse volumique est moins dense), l'air extérieur va pénétrer dans le bâtiment à travers les ouvertures ou fissures situées en partie basse de l'enveloppe, l'air intérieur s'échappant par des ouvertures ou fissures situées en partie supérieures. Un sens inverse de l'écoulement se produit lorsque l'air intérieur est plus froid que l'extérieur.

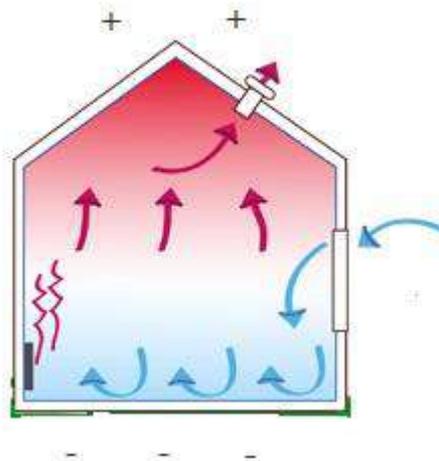


Fig. 2.3. Effet de tirage thermique dans un bâtiment (Ony, 2012)

2.3.1. Types de la ventilation naturelle

2.3.1.1. Ventilation monolatérale (unidirectionnelle)

C'est le cas où il n'y a des ouvertures que d'un seul côté, généralement une seule façade de l'espace à ventiler, tandis que l'autre côté est cloisonné et sans ouvrants (Fig.2.4).

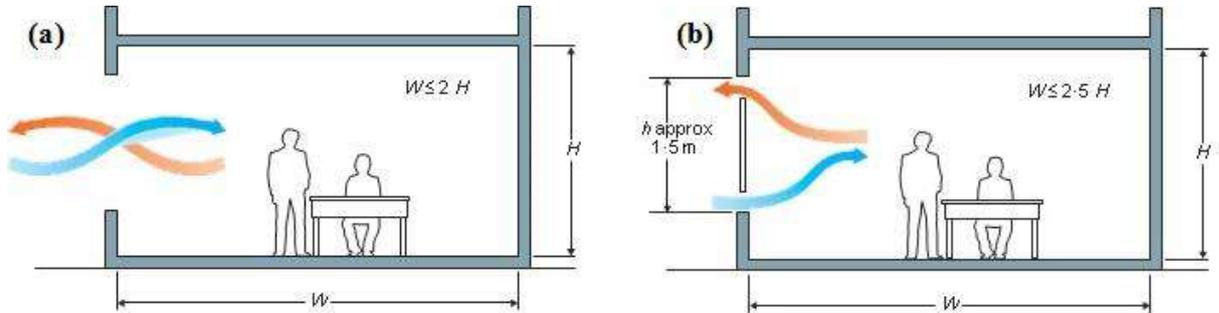


Fig. 2.4. Ventilation monolatérale (a) à simple ouverture (b) à doubles ouvertures (Yang et al., 2012)

2.3.1.2. Ventilation transversale

La ventilation transversale correspond au cas où l'air entre par une façade du bâtiment et ressort par une façade différente, généralement du côté opposé (Fig.2.5).

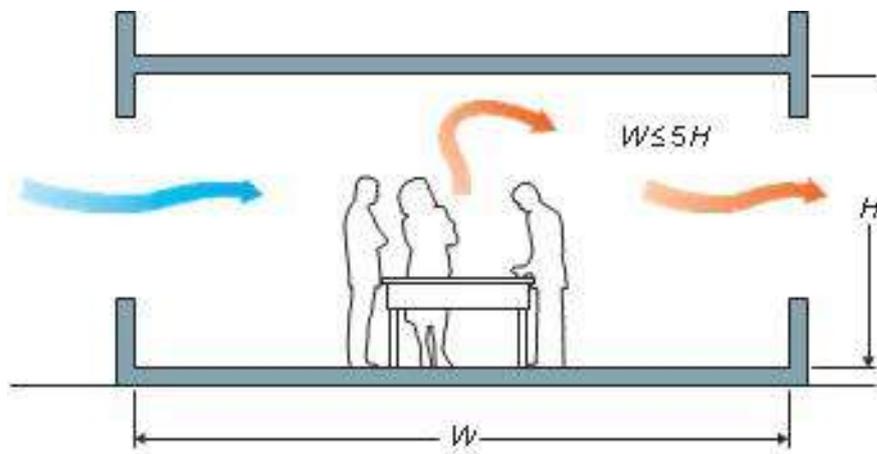


Fig. 2.5. Ventilation transversale (Yang et al., 2012)

2.3.1.3. Ventilation par tirage thermique (effet cheminée)

C'est une ventilation qui repose sur l'effet de tirage thermique, et qui peut être assistée par le vent si la sortie est conçue pour être toujours dans des zones de pression négative (Fig.2.6).

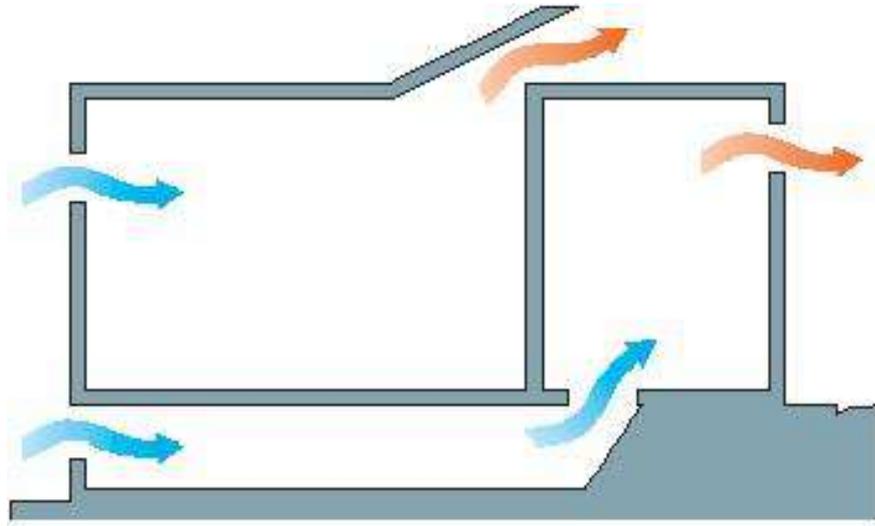


Fig. 2.6. Ventilation par tirage thermique (effet cheminée) (Yang et al., 2012)

2.3.1.4. Ventilation par effet du vent

Le vent génère des différences de pression sur les murs extérieurs : une surpression du côté du vent et une dépression de l'autre (Fig.2.7). L'air s'infiltré dans la maison par la paroi où une grande pression est exercée et est évacué par le mur où la pression est la plus basse.

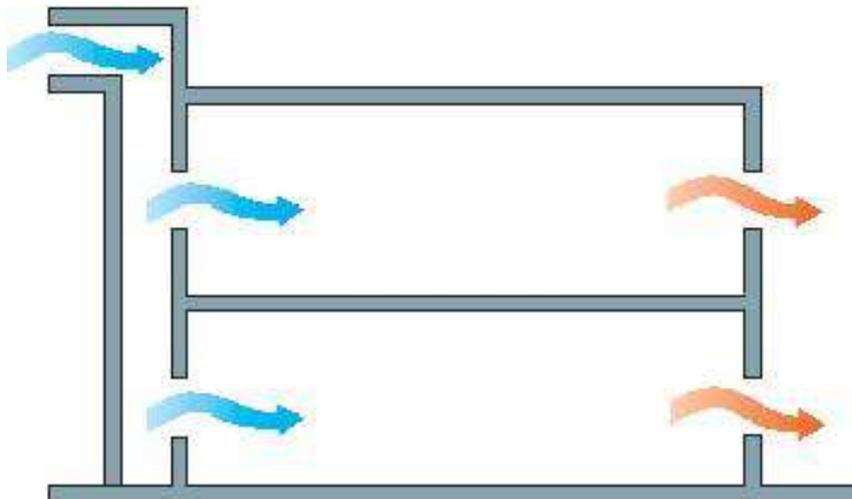


Fig. 2.7. Ventilation par effet du vent (Yang et al., 2012)

2.3.1.5. Ventilation par atrium

L'atrium permet de remplir de nombreuses fonctions, en amenant de la lumière naturelle notamment (Fig.2.8). Il joue également un rôle dans la ventilation naturelle, car il agit comme une cheminée solaire géante.

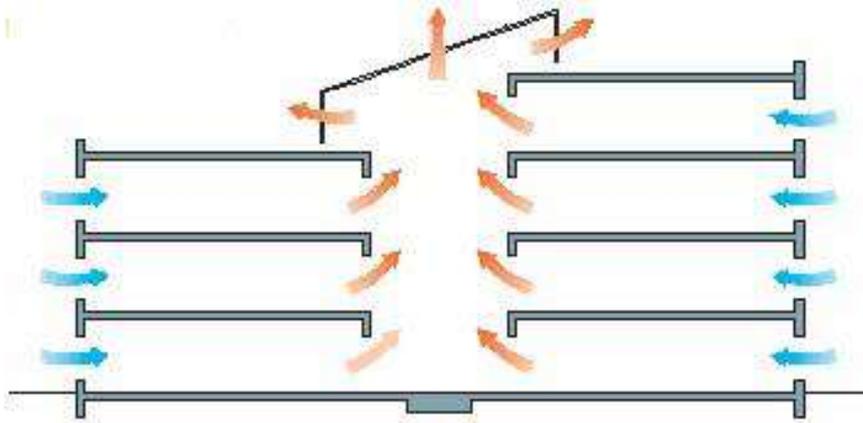


Fig. 2.8. Ventilation par atrium (Yang et al., 2012)

2.3.1.6. Ventilation par échangeur de chaleur air-sol

Échangeur de chaleur air-sol ou puits Canadian (Fig.2.9) est une technique écologique, renouvelable et passive (sans consommation d'énergie) utilisé depuis 3000 ans A.C par la population des régions arides pour le conditionnement de leurs maisons et pour l'assurance du confort thermique. Grâce à l'adaptation et variété d'utilisation de cette technique, son utilisation ne cesse de croître (Pérez-Lombard et al., 2008).

Durant la journée de la période estivale, la température de l'air extérieur est supérieure à la température du sous-sol. L'air est pulsé naturellement (par les vents dominants) ou mécaniquement (par ventilateur) à l'intérieure du tube enterré ou il effectue un échange de chaleur avec la couche qui entoure le tube par conduction et convection ou le sous-sol joue le rôle d'une source de dissipation. L'air perd quelque degrés durant le passage et il sera injecté directement dans le bâtiment ce qui améliore le refroidissement ou la ventilation naturelle (Sobti & Singh, 2015).

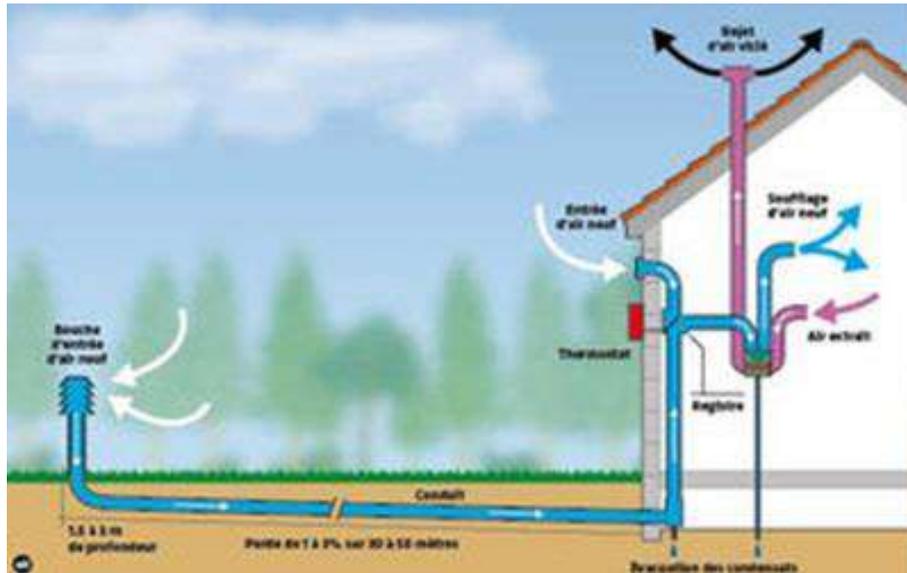


Fig. 2.9. Ventilation par échangeur de chaleur air-sol (Moniteur, 2011)

2.3.2. Avantages et les inconvénients de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle présente généralement les avantages suivants :

- Procure un rafraîchissement passif.
- Faible consommation d'énergie.
- Faible cout de maintenance.
- Propre, non-polluante et produit peu ou pas de bruit.
- Ces installations sont relativement peu coûteuses à installer et simple d'utilisation.
- Création de conditions ambiantes saines.
- Une durée de vie plus longue.
- Un éclairage supplémentaire du jour par les ouvertures.
- Autorégulation : plus de la chaleur se dégage plus il en est évacué.

La ventilation naturelle n'a pas que des avantages, elle présente également certains inconvénients :

- Elle dépend des conditions climatiques.
- Ne convient pas à tous les types de bâtiments car elle peut nécessiter des travaux importantes d'aménagement.
- Difficile à contrôler. Il n'est pas possible, par exemple de prédéfinir une température.

2.4. Techniques de refroidissement passif

Les techniques de refroidissement passif peuvent être une alternative prometteuse pour satisfaire les besoins de refroidissement ainsi que pour réduire la consommation

énergétique du bâtiment. Le choix d'une technique de refroidissement passif appropriée dépend de nombreux facteurs, notamment les conditions climatiques, les contraintes d'espace du bâtiment et les performances de la technique passive (Bhamare et al., 2019).

Ainsi, afin d'adopter une technique de refroidissement passif à un bâtiment donné, une connaissance approfondie des différentes techniques de refroidissement passif ainsi que de leurs applications et leurs paramètres de performance est nécessaire. Parmi ces techniques, nous citons ceci :

2.4.1. Refroidissement par cheminée solaire

Une cheminée solaire (appelée également cheminée thermique) est un dispositif permettant d'améliorer la ventilation naturelle d'un bâtiment en utilisant le mouvement convectif de l'air chauffé passivement dans un conduit exposé au rayonnement solaire. Dans sa plus simple forme, la cheminée solaire est constituée d'une cheminée peinte en noir. Pendant le jour, l'énergie solaire réchauffe le conduit de cheminée et l'air contenu à l'intérieur, y créant un appel d'air (Khanal & Lei, 2011).

Une cheminée solaire est une grande cavité généralement orientée vers le côté ensoleillé d'une construction, constituée d'un absorbeur sombre placé derrière un vitrage. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet de serre résultant de l'énergie solaire captée par le plan de verre et piégé dans le vide existant entre le vitrage et l'absorbeur (Fig.2.10). L'air est chauffé par la radiation solaire provoquant les forces de flottabilité qui conduit son déplacement vers le haut et en dehors de la cheminée solaire. Suivant le bilan de masse, l'air épuisé de la cheminée induit l'air extérieur frais par des ouvertures telles que des portes et des fenêtres fournissant ainsi la ventilation dans la construction.

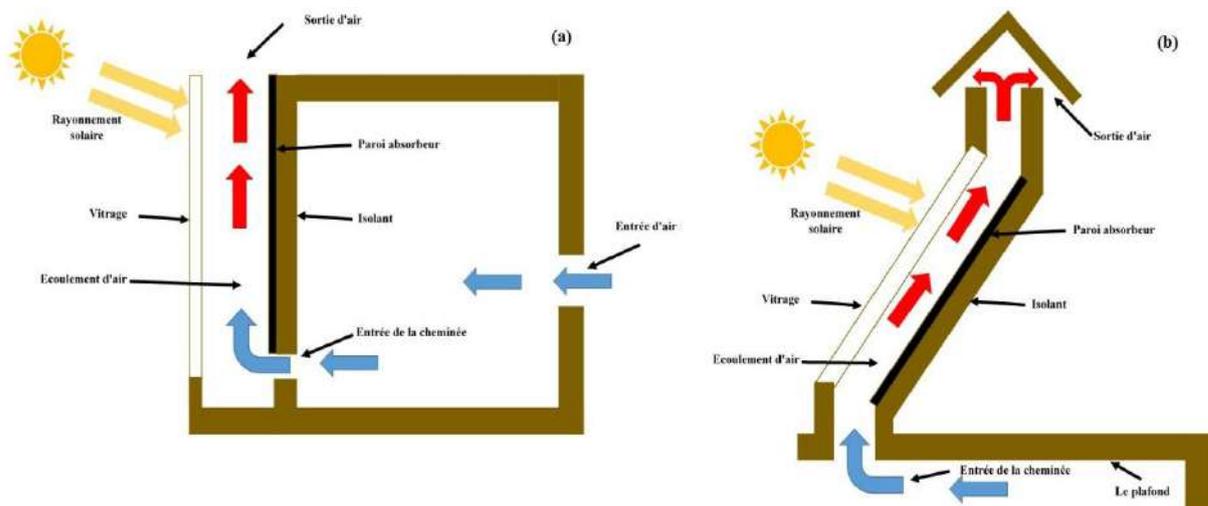


Fig.2.10. Schéma d'une cheminée solaire (a) verticale et (b) inclinée (Khanal & Lei, 2011)

Le principe de ventilation par cheminée solaire est principalement basé sur l'effet de tirage thermique qui est causée par les différences de densité entre l'intérieur et l'extérieur de construction. Il dépend des paramètres comme la hauteur, le gradient de température ainsi la conception et endroit d'admissions de ventilation.

2.4.2. Refroidissement par tours à vent

Les tours à vent sont une caractéristique distinctive et ancienne de l'architecture islamique. Elle a été utilisée pendant des siècles pour créer une ventilation naturelle dans les bâtiments. Des exemples de tours à vent (Fig. 2.11) peuvent être trouvés dans tout le Moyen-Orient, le Pakistan, l'Afghanistan et en particulier en Iran leurs formes s'adaptant aux caractéristiques du vent ainsi qu'au mode de construction (Yang et al., 2012). Elles s'appellent Badgir en Iran, malquaf en Egypte et Mangh au Pakistan.

Le vent, en tant que source d'énergie renouvelable, joue un rôle majeur dans les tours à vent. Une tour à vent utilise un mécanisme de refroidissement passif causé par l'effet de la gravité et conduit le flux d'air à l'intérieur des bâtiments (Hughes et al., 2012). Les tours à vent ont été employées depuis 3000 ans avant J.C dans les pays à climat chaud et aride pour fournir du confort thermique sans consommation d'énergie ce qui assure une compatibilité avec les exigences modernes. Elles sont maintenant parfois incorporées dans l'architecture occidentale.

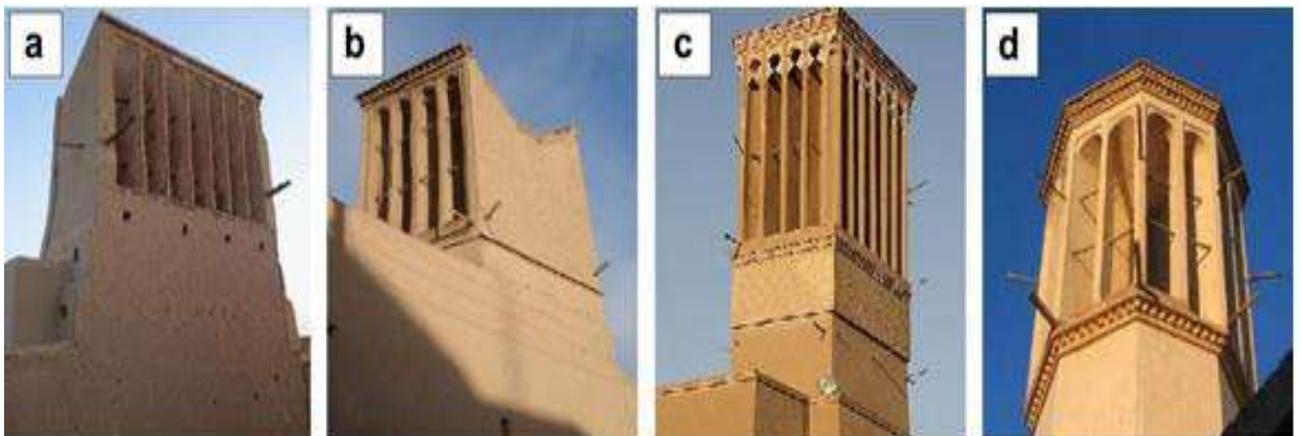


Fig.2.11. Tours à vent traditionnelles avec un nombre différent d'ouvertures : (a) à une face, (b) à deux faces, (c) à quatre faces, (d) octaèdre (Hughes et al., 2012)

2.4.2.1. Tours à vent avec échangeur de chaleur air-sol

Des tours à vent traditionnelles ont été raccordées avec un Qanât ou un réseau d'eau souterrain ou avec un échangeur air-sol (Fig.2.12).

La tour est placée au-dessus de la maison avec son ouverture faisant face loin de la direction du vent dominant. Le flux d'air à travers le puits vertical produit une pression inférieure au côté sous le vent de la structure. En conséquence, l'air frais est tiré par succion du tunnel ou Qanât pour remplacer l'air chaud et vicié qui quitte la structure. L'air chaud qui passe dans le Qanât (plusieurs mètres sous le sol) sera en contact avec l'eau qui abandonne sa chaleur latente de vaporisation et s'évapore dans l'air qui sera relativement plus froid donc un effet de refroidissement supplémentaire (Hughes et al., 2012).

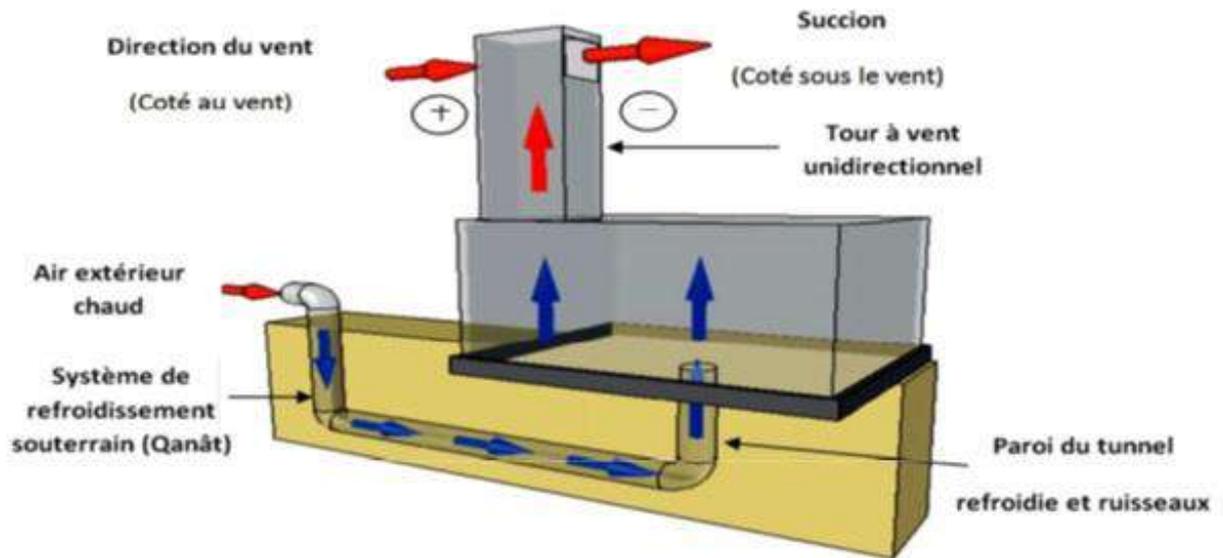


Fig.2.12. Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain (Hughes et al., 2012)

2.4.2.2. Tours à vent avec cheminée solaire

Les cheminées solaires sont utilisées pour améliorer la ventilation naturelle par l'effet de tirage thermique par une convection forcée qui aura lieu lorsque le flux est induit par une force extérieure telle que la pression négative générée par le courant d'air à la sortie de la tour (Hughes et al., 2012). Les rayons solaires chauffent l'air contenu dans la paroi réceptrice de la cheminée solaire. L'air chaud moins dense sort par la partie supérieure de la tour (courant ascendant d'air) et aspire l'air frais par les ouvertures ou les fenêtres (Fig.2.13).

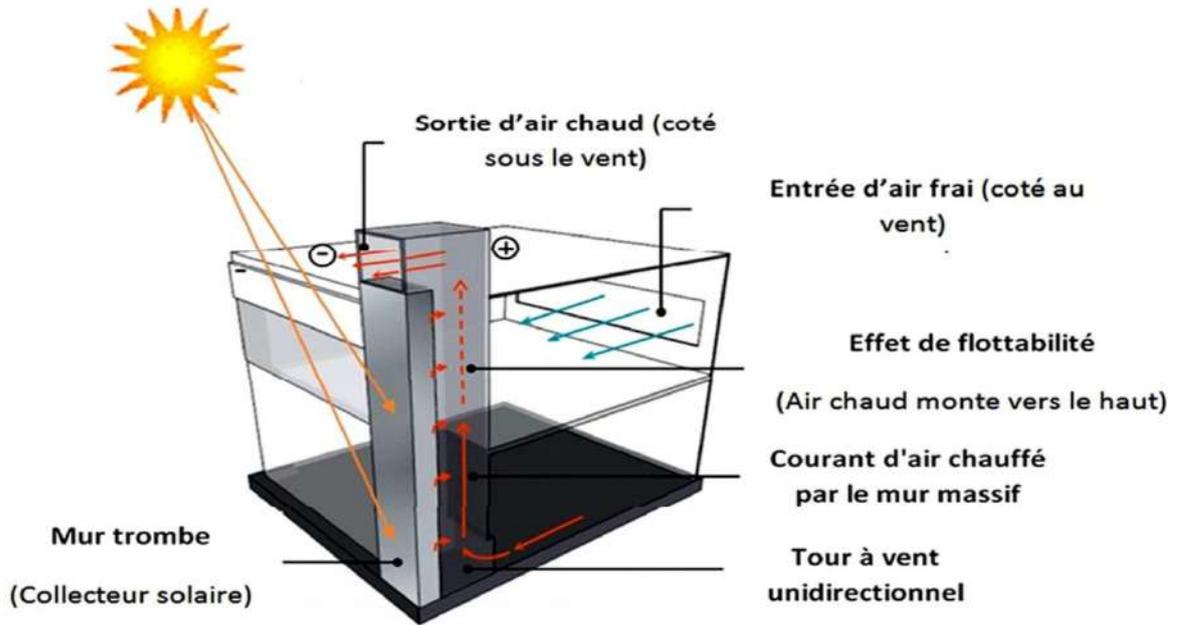


Fig.2.13. Système de Tour à vent intégrée avec une cheminée solaire (Hughes et al., 2012)

2.4.2.3. Tours à vent avec ventilation nocturne

La ventilation nocturne est une stratégie de refroidissement passif basée uniquement sur les forces induites par le vent ou la flottabilité (Hughes et al., 2012). La fraîcheur de nuit stockée dans les murs et les cloisons de la tour et refroidit l'air induit au cours de la journée, ce qui le rend plus dense donc il s'enfonce à travers la base de la tour et dans la structure.

La ventilation nocturne a pour conséquence la réduction des températures maximales journalières intérieures en particulier dans la période matinale, la création d'un déphasage dans le temps entre les températures de l'air intérieur et extérieur. La ventilation peut se faire mécaniquement avec un système de ventilation électrique ou naturellement à cause de l'action du vent sur ouvrants extérieurs ou l'effet cheminée.

2.4.2.4. Tours à vent intégrés à la cour ouverte

Pendant la journée, la cour est exposée au rayonnement solaire. L'air dans la cour se réchauffe et monte (Hughes et al., 2012). L'air froid au niveau du sol s'écoule à travers les ouvertures pour le remplacer en créant un écoulement d'air à l'intérieur de la structure (Fig.2.14).

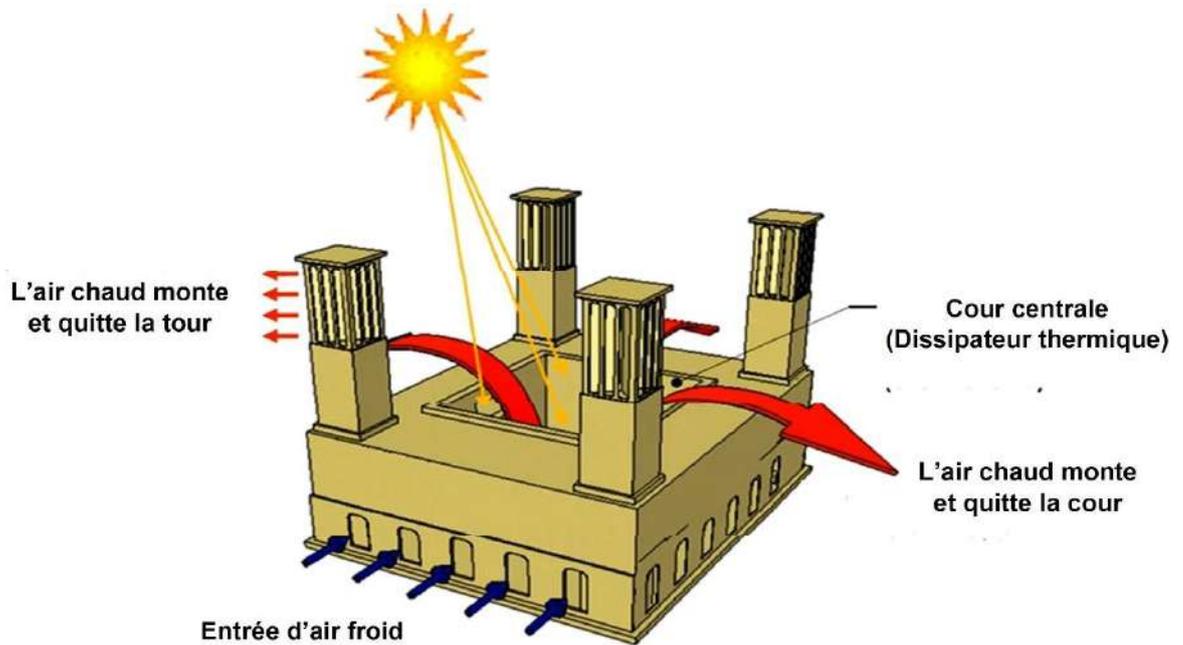


Fig.2.14. Maison traditionnelle qui combine la cour ouverte avec les tours à vent (Hughes et al., 2012)

Pendant la nuit, le processus de refroidissement est inversé. L'air de la surface refroidie s'enfonce dans la cour et entre dans les salles à travers les ouvertures de bas niveau et sort à travers les ouvertures de niveau supérieur. Ce système peut fonctionner efficacement dans des climats chauds et secs, où la ventilation pendant le jour n'est pas souhaitable.

2.4.2.5. Tours à vent intégrés aux toits incurvés

Dans les régions arides, les toits incurvés ou en forme de dôme sont généralement préférable par rapport aux toits plats (Hughes et al., 2012). Utilisés depuis 3000 ans Avant .J.C, les toits incurvés ont une surface beaucoup plus grande pour libérer la chaleur (refroidissement rapide). En général, le toit est positionné de manière centrale dans la partie supérieure de la structure. L'air chaud à l'intérieur du bâtiment au niveau du dôme sort par les ouvertures (ou les événements) de toit incurvé (Fig.2.15). L'air chaud est aspiré à l'extérieur du dôme, et l'air frais pénètre par les fenêtres ou les ouvertures de la tour à vent.

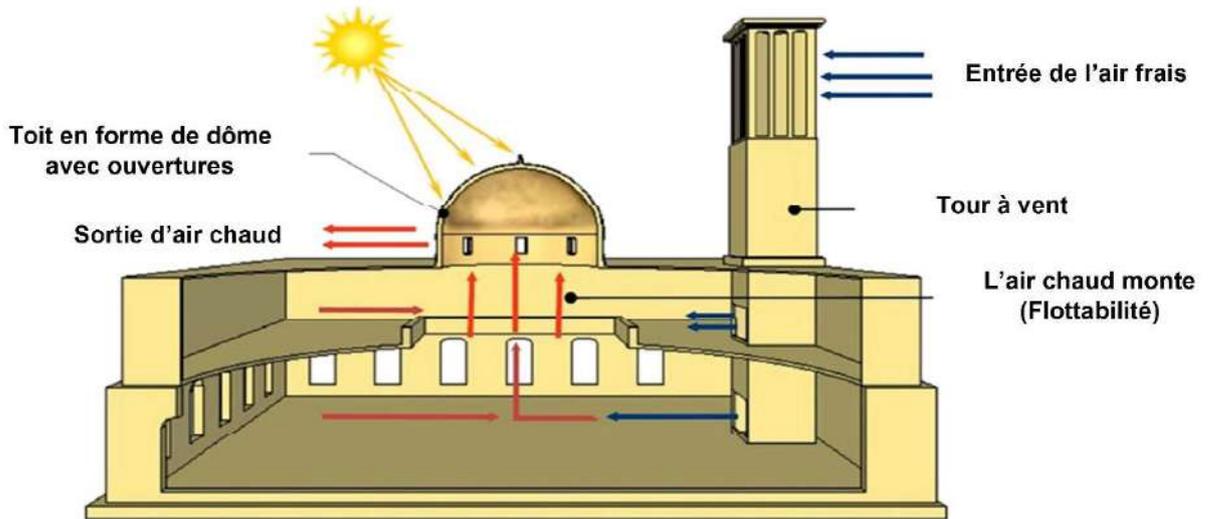


Fig.2.15. Tour à vent intégrée avec un toit incurvé (Hughes et al., 2012)

2.4.3. Refroidissement par protection solaire

La protection solaire est un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique et la gestion de la lumière naturelle des bâtiments existants et optimiser la conception des bâtiments basse consommation (ES-SO 2018). La protection des apports thermiques est la première étape vers l'obtention de conditions de confort à l'intérieur d'un bâtiment. Les gains de chaleur peuvent être divisés en gains de chaleur externes et gains de chaleur internes. Le gain de chaleur externe provient du rayonnement solaire direct et de la température ambiante, tandis que le gain de chaleur interne à des sources telles que les activités humaines, les appareils électroménagers, ...etc. (Bhamare et al., 2019). La protection contre les gains de chaleur externes peut être obtenue en améliorant les conditions microclimatiques d'un bâtiment ou la limitation du rayonnement solaire direct.

2.4.3.1. Microclimat urbain

Un microclimat est défini comme les conditions climatiques limitées à une région géographique très petite, significativement distinctes du climat général de la zone où se situe cette région. Les microclimats apparaissent naturellement et leur taille est variable. Par exemple, une ville crée ses propres modèles climatiques, et plus la zone urbaine est étendue, plus ceux-ci seront importants.

En outre, la compréhension du microclimat urbain passe inévitablement par une meilleure connaissance de la zone de chaleurs urbaines en combinant mesures et modélisation (Alonso & Renard, 2020).

a) Végétation

La végétation modifie le microclimat et la consommation énergétique des bâtiments en abaissant les températures de l'air et de surface et en augmentant l'humidité relative de l'air. De plus, les plantes peuvent contrôler la pollution de l'air, filtrer les poussières et réduire les nuisances sonores. Le principal avantage des arbres urbains, en tant qu'élément de conception réactif bioclimatique, est de produire de l'ombre, alors que son principal inconvénient est de bloquer le vent (Yoshida et al., 2006).

b) Plans d'eau

Les plans d'eau modifient le microclimat de la zone environnante, réduisant la température de l'air ambiant, soit par évaporation, soit par contact d'air chaud avec une surface d'eau froide. Les fontaines peuvent être utilisées comme sources de refroidissement pour abaisser la température de l'air extérieur et de l'air entrant dans le bâtiment (Geetha & Velraj, 2012).

2.4.3.2. Contrôle solaire

a) Ouvertures

Les ouvertures sont les moyens de communication de l'édifice : leurs positions, leurs dimensions et leurs proportions règlent l'entrée de l'air, de la lumière et du soleil. La combinaison appropriée de l'orientation, de la taille et de l'inclinaison des différentes ouvertures sur l'enveloppe du bâtiment est d'une importance vitale. En effet, ces paramètres affectent la vue de la surface du soleil et du ciel au cours des cycles quotidiens et mensuels (Kamal, 2012).

b) Vitrage

Les propriétés thermiques des surfaces vitrées d'un bâtiment affectent la pénétration du rayonnement solaire à l'intérieur. Les influences de la largeur du canal et des dimensions des ouvertures d'entrée et de sortie affectent le processus de convection et, par conséquent, affectent les performances de chauffage globales.

La recherche dans le domaine de la technologie des systèmes de vitrage a été stimulée, passant d'un vitrage simple aux systèmes de fenêtres à faible émission, puis à la faible transmission thermique, aux vitrages sous vide, aux fenêtres électro-chromiques (Kamal, 2012).

c) Isolation

L'effet de l'isolation est de réduire de gain et la perte de chaleur. Plus on met un isolant dans l'enveloppe extérieure du bâtiment, moins de chaleur est transférée vers ou en dehors du bâtiment. L'isolation contrôle également la température moyenne de rayonnement intérieur en isolant les surfaces intérieur de l'influence des conditions extérieures, et réduit également les courants d'air produits par les différences de température entre les parois et l'air. Dans les climats chauds l'isolation est placée sur la face extérieure des parois ou le toit, de telle sorte que la masse thermique des parois est faiblement en contact avec la source externe et fortement couplée avec l'intérieur (Kamal, 2012).

d) Ombrage

L'ombrage désigne l'obstruction partielle ou complète du rayon de soleil dirigé vers une surface par un objet ou une surface intermédiaire. L'ombre varie en position et en taille en fonction de la relation géométrique entre le soleil et la surface concernée.

Les dispositifs d'ombrage sont essentiellement un deuxième lien entre l'éclairage naturel et la performance thermique des espaces périmétriques. Ainsi, une analyse intégrée doit être réalisée afin de prendre en compte les interactions entre les différents paramètres et d'atteindre des résultats optimaux (Geetha & Velraj, 2012).

2.4.4. Refroidissement par évaporation

Le rafraîchissement par évaporation est une technique de rafraîchissement passif dans laquelle l'air extérieur de ventilation est refroidi en faisant évaporer de l'eau avant qu'il soit injecté dans le bâtiment. Son principe physique s'explique par le fait que la chaleur latente d'évaporation de l'eau est fournie par l'air de ventilation ce qui se traduit par une diminution de sa chaleur sensible et par conséquent, l'air se refroidit.

Ce type de rafraîchissement est particulièrement efficace dans les régions chaudes et sèches et dans des climats relativement humides. La réduction de la température entre l'intérieur et l'extérieur peut atteindre jusqu'à 10 °C dans les zones arides en utilisant cette technique (Saadatian et al., 2012). Les tours à vent incorporant des colonnes mouillées sont équipées de rideaux de tissu ou des conduits d'argile, espacés de 5-10 cm l'un de l'autre et accrochant verticalement à l'intérieur de la colonne. Les rideaux sont mouillés en vaporisant des gouttes d'eau par un système de bec au sommet de la tour (Fig.2.16). Les tours à vent avec des surfaces mouillées sont équipées des blocs d'évaporation à l'entrée de la tour.

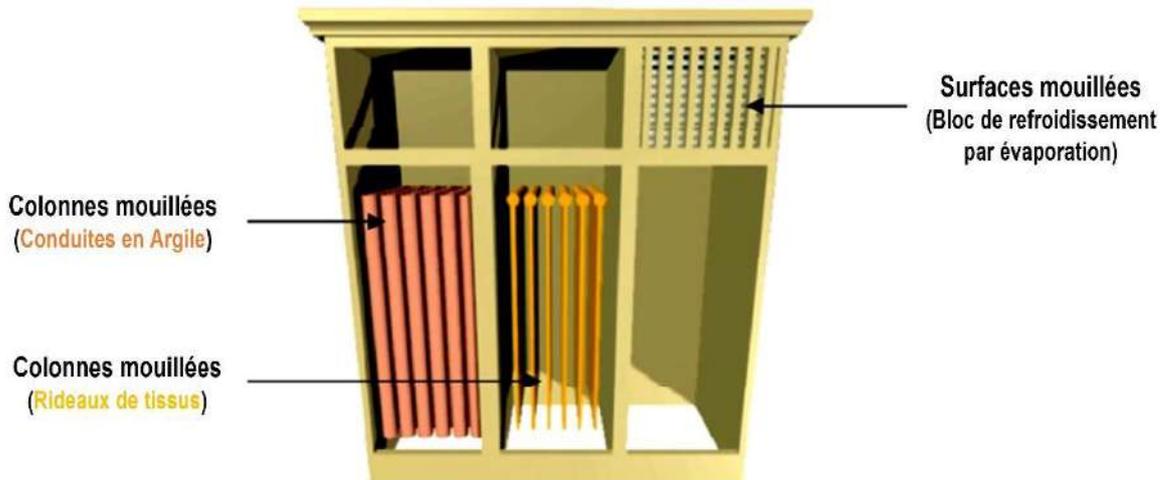


Fig.2.16. Différents systèmes d'évaporation utilisés dans les tours à vent (Hughes et al., 2012)

2.4.5. Refroidissement par la géothermie

L'utilisation de la terre comme dissipateur thermique ou source de refroidissement ou chauffage de l'air dans des tuyaux enterrés ou des habitats souterrains a été un témoignage de l'architecture ancienne. L'air traversant un sous-sol ou une canalisation enterrée à quelques mètres de profondeur se refroidit en été et se réchauffe en hiver. Le refroidissement par géothermie est la rafraîchir du bâtiment par l'inertie thermique du sol en contact direct comme l'habitat souterrain et indirect par des conduits enterrés dans le sol comme l'échangeur de chaleur air-sol.

2.4.5.1. Refroidissement par échangeur de chaleur air-sol

L'échangeur de chaleur air-sol ou puits Canadien est une technique écologique, renouvelable et passive (sans consommation d'énergie) utilisé pendant des siècles par la population des régions arides pour le conditionnement de leurs maisons et pour l'assurance du confort thermique (Pérez-Lombard et al., 2008). Le principe est simple, faire passer un tuyau de bonne conductivité thermique (acier, PVC, etc.) à une certaine profondeur où la température annuelle du sous-sol reste inchangeable au cours des saisons de l'année (Fig.2.17).

Durant le jour et la période estivale, la température de l'air extérieur est supérieure à la température du sous-sol. L'air est pulsé naturellement (par les vents dominants) ou mécaniquement (par ventilateur) à l'intérieur du tube enterré ou effectue un échange de chaleur avec la couche qui entoure le tube par conduction et convection ou le sous-sol joue

le rôle d'une source de dissipation. L'air perd quelque degrés durant le passage et il sera injecté directement dans le bâtiment ce qui améliore le refroidissement ou la ventilation naturelle (Sobti & Singh, 2015).

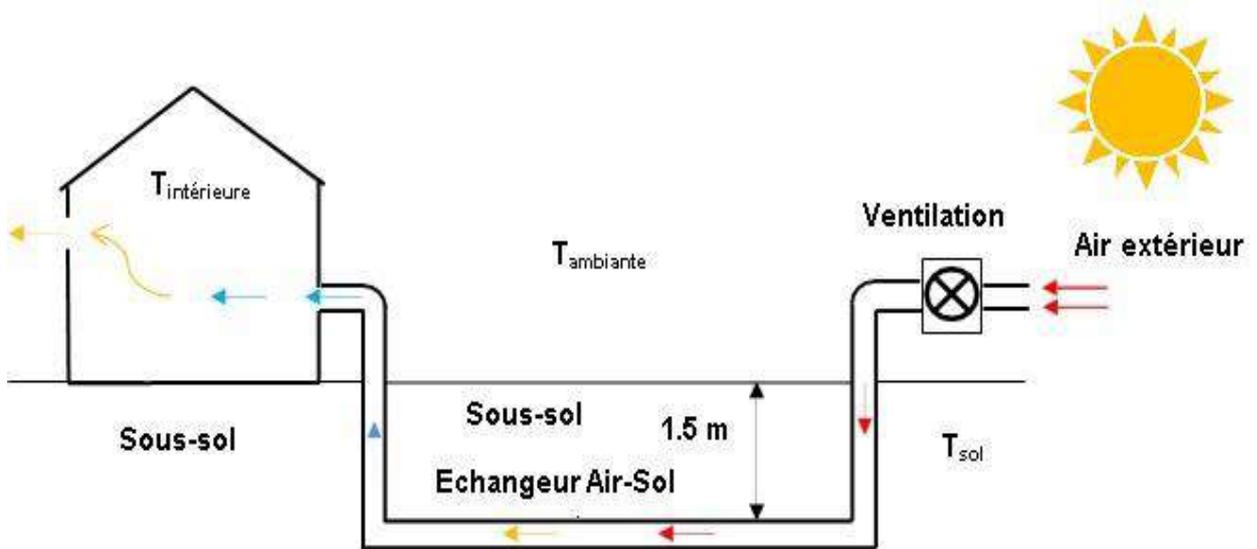


Fig.2.17. Échangeur air-sol en fonctionnement durant les jours de l'été (Benzaama, 2017)

2.4.5.2. Refroidissement par construction souterraine

Pour s'abriter contre la chaleur estivale accablante, les habitants de la région Sud ont développé une technique architecturale spéciale, c'est que l'on appelle localement « Dahalisse » ou « Damous ». Celui-ci est une pièce construite au-dessous du niveau du sol d'une maison et dont les parois sont enterrées dans le sol ce qui la met à l'abri des conditions météorologiques extérieures. Donc, la température à l'intérieur de la pièce souterraine varie peu pendant la journée et elle oscille autour de la température moyenne journalière. Comme cette température est basse par rapport à la température journalière, cela permet aux occupants de profiter de cette fraîcheur pour prendre une bonne sieste pendant la journée durant la période estivale. Parfois, on se sert d'un ventilateur pour se rafraîchir encore mieux (Benhamou, 2015).

Dans l'habitat souterrain en plus de la réduction de nombre de surfaces exposées aux rayons solaires directs, exploite les propriétés thermiques de la terre qui à l'état sec, a une faible conductivité thermique et aussi une faible diffusion thermique.

L'amplitude des variations de la température de l'air dans ce type de constructions reste faible car, à la très forte inertie de la terre sont associés un ensoleillement minimal et un emprisonnement de l'air froid nocturne (Hamida, 2007). La température dans le sol est

Chapitre 2 : Stratégies de refroidissement passif

presque constante où légèrement variable et généralement proche de la température moyenne annuelle de la région, qui dans des nombreux cas est assez fraîche pour agir comme un dissipateur de chaleur pendant les jours d'été. Exemple de la construction souterraine d'Ouargla en Algérie (Fig.2.18.a), Matmata en Tunisie (Fig.2.18.b) et Gharyan en Libye (Fig.2.18.c).



Fig.2.18. Constructions souterraines : (a) Ouargla en Algérie, (b) Matmata en Tunisie et (c) Gharyan en Libye (Bakoosh, 2019)

C'est en effet à partir de l'architecture vernaculaire que l'architecture bioclimatique développe certaines techniques passives apprises sur la conception de l'habitat et qui ont évolué par la suite.

2.5. Conclusion

Malgré les avancées technologiques dans le domaine de la climatisation dans le bâtiment, le refroidissement passif demeure une importante stratégie bioclimatique.

Dans ce chapitre, une analyse approfondie a été préalablement réalisée sur les techniques de rafraîchissement passif dans le bâtiment. Ces techniques permettent de réduire la consommation énergétique des bâtiments tout en y procurant un niveau de confort thermique acceptable. En effet, les performances thermiques de ces techniques sont dépendantes du climat et doivent être explorées dans des conditions climatiques réelles. De plus, même si bon nombre de ces techniques ont été largement étudiées dans la littérature, les mesures effectuées pour l'évaluation de leur performance thermique se limitent essentiellement aux mesures de la température de l'air intérieur.

CHAPITRE 3

État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

3.1. Introduction

La consommation énergétique excessive dans l'habitat contemporain en milieu chaud et aride renvoie à une réflexion à la construction vernaculaire par ses qualités intrinsèques d'adaptation au climat qui peut fortement contribuer à une stratégie d'économie d'énergie, dans le but de réduire les besoins énergétiques de l'habitat en utilisant des solutions naturelle (Akyildiz, 2021).

Afin d'acquérir une réelle compréhension du fonctionnement de l'habitat vernaculaire, il est essentiel de dévoiler le génie de l'homme ancien et de revoir le contexte historique de la construction vernaculaire à travers l'analyse bibliographique et la synthèse des connaissances dans les concepts de la construction traditionnelle.

Dans ce chapitre, nous examinons la construction vernaculaire y compris les bâtiments souterrains à partir d'aspects préliminaires tels que le contexte historique, la classification et les critères de performance énergétique thermique ultérieurs, et nous essayons d'élaborer les variables de performance thermique et de mener une étude plus approfondie des avantages et des inconvénients de cette technique de refroidissement passif vers différentes perspectives de développement durable.

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été menées dans le domaine de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments sur la base des principes de l'architecture bioclimatique. Certains d'entre eux reviennent à l'architecture vernaculaire (Widera, 2021).

3.2. Analyse bioclimatique et énergétique de la construction vernaculaire

L'architecture vernaculaire du monde entier est très riche en techniques ingénieux que les premiers bâtiments utilisaient pour se protéger des différentes conditions climatiques auxquelles ils étaient soumis. Le climat a été le principal facteur environnemental qui a affecté l'architecture vernaculaire dans le monde entier. Des facteurs divers, compliqués et différents forment les conceptions architecturales, mais le climat est considéré comme le principal constructeur environnemental des anciens établissements. L'architecture vernaculaire, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, représente un témoin vivant de l'adéquation de cette architecture à l'environnement local, qui construit le concept d'architecture durable.

Pour Olgyay (Olgyay, 1963) la construction vernaculaire joue un rôle important dans l'évolution de l'architecture, car elle représente le contexte culturel, social et politique d'une

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

société. La conception de l'habitat a reflété, tout au long de son histoire, différentes solutions pour chaque période et contexte afin de résoudre les problèmes d'inconfort tel que : le froid, la chaleur, l'humidité et le vent.

3.2.1. Évolution de l'habitat traditionnel saharien

L'habitat traditionnel constitue la plus grande partie de l'environnement bâti de l'homme, l'analyse de la conception et de l'utilisation de cet habitat fait apparaître, pleinement, La somme extraordinaire, de connaissances techniques (particulièrement en termes d'économie d'énergie et de matériaux) de possibilité d'adaptation contenue dans l'habitat traditionnel fait partie du patrimoine humain.

Les études sur l'architecture traditionnelle et leur adaptation au climat chaud sont jusqu'à présent nécessaire pour répertorier l'ensemble des techniques traditionnelles passives de régulation thermique. L'homme a utilisé les matériaux les plus disponibles et les moins coûteux qu'il peut trouver : ceux qui se trouvent à sa portée, ressources du sol, du sous-sol, du couvert végétal, qui ont l'avantage d'être facilement exploitables, renouvelables et adaptées à son environnement (Saifi, 2016).

Les habitants dans la région d'Ouargla ont pu produire un habitat adéquat à la rudesse du climat, donnant ainsi un maximum de confort avec un minimum de dépenses. L'homme ouargli a fait, le long des siècles, appel à son génie, son savoir-faire et à sa création artistique pour construire ses maisons communément appelées par la communauté locale de confins d'ici-bas, car la maison est pour le peuple du désert est le symbole visible de l'identité familiale, la plus importante possession qu'un homme ne puisse jamais avoir (Figure 3.1).



Fig.3.1. Habitats construits entièrement en matériaux de construction locaux

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Une importante partie du sous-sol de la construction limite considérablement les échanges calorifiques et permet de se rapprocher d'un bilan thermique équilibré durant toute la journée et durant toute l'année. D'autre part, l'homme a utilisé les matériaux de construction locaux les plus disponibles et les moins coûteux qu'il peut trouver : ceux qui se trouvent à sa portée, ressources du sol, du sous-sol, du couvert végétal, qui ont l'avantage d'être facilement exploitables, renouvelables et adaptées à son environnement.

La température élevée pendant les jours, surtout en été, et les basses températures la nuit sont les principales caractéristiques du climat chaud et aride. Des étés très chauds et des hivers froids, le manque de précipitations et les tempêtes de poussière et de sable sont les principaux problèmes auxquels sont confrontés les habitants des régions chaudes et arides. Pendant des années et des années, les habitants de cette région ont trouvé des solutions pour vivre sous ce climat rigoureux. Les solutions qui ont été trouvées dans ces domaines sont similaires partout dans le monde (Zuaiter, 2015). Ces conditions météorologiques extrêmes ont forcé les gens à créer leurs propres microclimats. Aujourd'hui, certaines de ces stratégies vernaculaires sont redécouvertes. Les caractéristiques de la construction vernaculaire du climat chaud et aride sont très bénéfiques pour l'étude et la réutilisation dans la construction moderne.

Les bâtiments vernaculaires construits en s'adaptant aux conditions climatiques et géographiques de la région dans laquelle ils se trouvent, en plus d'être des valeurs de patrimoine culturel, attirent l'attention avec leurs systèmes architecturaux qui assurent une meilleure efficacité énergétique et causent moins de pollution environnementale par rapport aux bâtiments contemporains (Akyildiz, 2021; Sahebzadeh et al., 2017).

Les constructions vernaculaires dans le Sud Algérien fournissent de bonnes leçons pour bénéficier d'une ventilation et d'un refroidissement naturel, tout en offrant un abri du soleil et en s'adaptant généralement au climat local sévère. Il présente des caractéristiques précieuses qui pourraient être une source d'inspiration pour le renforcement de la durabilité dans la conception des bâtiments et l'urbanisme à l'avenir. Ces caractéristiques sont venues du fait que les constructions vernaculaires ont été construites en réponse à des considérations climatiques et environnementales (Bouchair et al., 2013).

L'autre type d'habitat que l'on rencontre est connu sous le terme de ksar. Dans ce cas, l'espace cultivé (la palmeraie ou jnān) est distinct de l'espace habité. Certains ksour peuvent être considérés comme de véritables cités en raison de la densité de l'habitat et de l'ancienneté de l'installation des lignages qui induisent une tradition dans la gestion des

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

affaires communes et un lien social très fort marqué, entre autres, par une ritualisation très codifiée des échanges et des relations.

De nombreuses études ont été menées sur différents aspects de l'architecture vernaculaire de la région chaude et aride en l'Algérie dans des Ksour comme Ksar de : Ouargla, M'Zab (Ghardaia), Béchar et Biskra. Ces études ont passé en examen les éléments et les techniques que les habitants locaux ont utilisés afin de créer un cadre de vie confortable dans le confinement des maisons vernaculaires. Le mot se prononce « gsar ». C'est une altération phonique de la racine arabe qasr qui désigne ce qui est court, limité. C'est-à-dire un espace limité, auquel n'a accès qu'une certaine catégorie de groupes sociaux. Les ksour (pluriel de Ksar) sont le résultat d'un processus continu qui a impliqué les capacités de la société saharienne à se concevoir, se planifier, se construire et se maintenir dans cet espace géographique aride. Le Ksar représente l'habitat traditionnel très compact fermé, construit en matériaux traditionnels (Djeradi, 2013).

3.2.1.1. Ksar d'Ouargla

Connu sous le nom d'Ouardjelane (ibadite), ou Ouarglène (berbère), le ksar d'Ouargla est, sans doute, celui qui est le plus enraciné dans l'histoire du Sahara. Il est entouré d'un rempart de 12 mètres de haut et s'ouvre sur l'extérieur à travers sept portes, encore existantes, à savoir Bab Azzi, Bab-Soltane, Bab-Ahmid, Bab El-Boustane, Bab-Rabaâ et Bab-Er-rabie, où convergent les nombreuses venelles issues de ses trois principaux quartiers : Béni-Brahim, Béni-Sissine et Béni-Ouaguine.

Ksar d'Ouargla témoigne non seulement de la capacité d'adaptation de l'homme à son milieu naturel le plus sévère, mais aussi du génie populaire qui a façonné toute une ville dans ces moindres détails (Fig.3.2).



Fig.3.2. Ksar d'Ouargla (Belkhir Hebbal et al., 2020)

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Abdou et Boumaza (Abdou & Boumaza, 2004) ont conclu que la combinaison de certains éléments architecturaux « Skiffa, shoubak et cage d'escalier » associés avec le comportement des occupants participent à améliorer la sensation de confort à l'intérieur du Ksar Ouargla constituent aussi une stratégie de rafraîchissement évaporatif. L'analyse bioclimatique a déterminé une zone de confort. La confrontation des résultats de température intérieure aux limites de confort montre que l'ambiance à l'intérieur des espaces étudiés est très acceptable.

Alkama et Sebti (Alkama & Sebti, 2012) ont étudié l'influence de la reconstruction du Ksar d'Ouargla avec des matériaux et des techniques modernes qui l'ont détruit l'adaptation au climat chaud. Ils ont conclu par les mesures expérimentales que la transformation morphologique dans la construction procréée des conditions défavorables de microclimat dans le tissu transformé, qui sont affectées par la chaleur surplus résultante de l'énergie consommée par les maisons du Ksar et de la chaleur sensible stockée dans les matériaux de construction modernes.

Sebti et al. (Sebti et al., 2013) ont démontré par l'observation et les mesures sur site que Ksar Ouargla est une bonne référence d'adaptation aux conditions climatiques difficiles et il apporte de bonnes solutions environnementales de conception passive à la consommation d'énergie et aux effets négatifs sur l'environnement. En plus des techniques passives reconnues pour être à l'origine de la qualité de l'ambiance intérieure des maisons du Ksar tel que les dimensions réduites des ouvertures, l'orientation des constructions ou les matériaux de construction.

Hebbal et al. (Hebbal et al., 2020) ont conclu que le Ksar d'Ouargla est une référence très intéressante pour l'adaptation aux conditions climatiques sévères et son architecture traditionnelle apporte de bonnes solutions bioclimatiques en utilisant une combinaison de conceptions passives : végétal, ombrage et ventilation naturelle. Ces solutions de conception passive permettent aux bâtiments de s'adapter de manière plus appropriée à leurs climats locaux afin de créer un environnement favorable.

3.2.1.2. Ksar de M'Zab

La vallée du M'Zab, située dans la wilaya de Ghardaïa (Fig.3.3). Elle s'est développée dans des conditions climatiques particulières, un climat désertique peu favorable à l'installation d'établissement humain. La vallée est connue par ses cinq Ksour historiques

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

d'un caractère architectural et paysager exceptionnel : Al Atteuf, Bounoura, Ghardaïa, Melika et Beni Isguen.

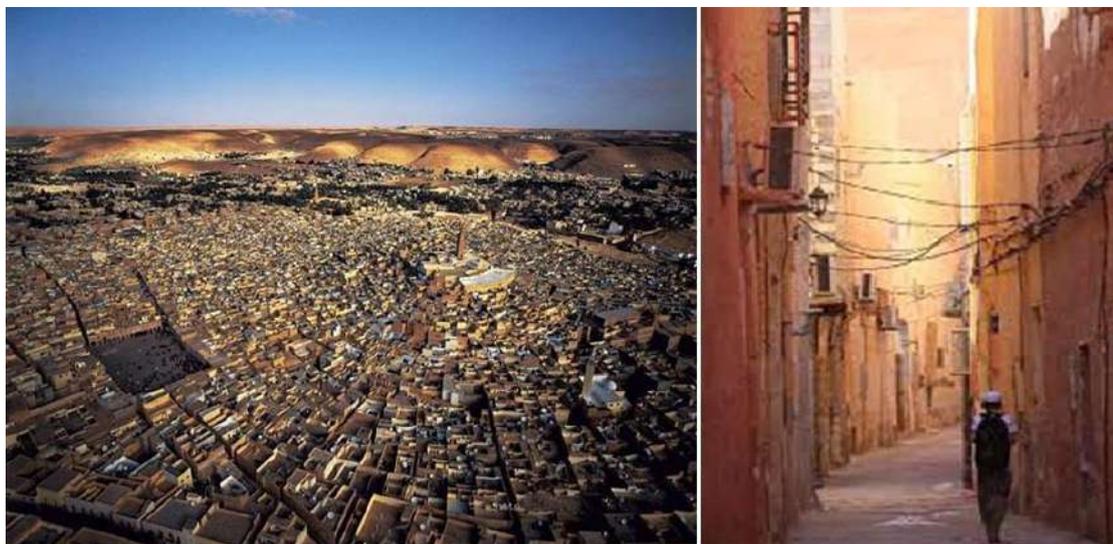


Fig.3.3. Ksar de M'Zab (Bencheikh & Rchid, 2012)

Ali-Toudert et al. (Ali-Toudert et al., 2005) ont comparé les typologies anciennes et nouvelles dans la vallée du Mzab (Ksar Beni-Isguen). Cette étude montre certaines preuves de l'existence d'une ventilation dans les rues du l'ancien Ksar malgré la forte densité du tissu urbain. De plus, ce travail montre que des mesures plus continues sont nécessaires pour établir la dépendance entre la température de l'air et la structure urbaine.

Bencheikh et Rchid (Bencheikh & Rchid, 2012) ont étudié l'influence de la couverture verte durant l'été sur le microclimat dans le Ksar de Ben-Isguen (Vallée du M'Zab). Les résultats ont prouvé que la végétation peut produire un effet rafraîchissant de 2 à 3 °C en moyenne. Les jardins et les parcs urbains en particulier, autour de Ksar contribuent à atténuer le stress thermique en créant ce que l'on appelle « l'effet oasis » à travers les espaces publics. Ils améliorent le confort thermique et réduisent la consommation d'énergie pour le refroidissement.

Gueliane (Gueliane, 2018) a conclu que l'étude de l'architecture du Ksar M'Zab a devenu intéressante, en termes de logique d'implantation, d'utilisation économe des ressources, des techniques d'adaptation climatiques ainsi que l'interprétation spatiale d'un contexte culturel et social particulier. Sa durabilité réside dans sa possibilité de s'adapter à un contexte, à un environnement naturel et humain déterminé, en exploitant au mieux ce qui est localement disponible, pour atteindre le maximum de confort possible.

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Kadri et Bouchair (Kadri & Bouchair, 2020) ont montré par les mesures expérimentales que les valeurs de température sont stables dans une maison située dans l'ancien Ksar de Béni Isguen. De plus, les valeurs de température sont incluses dans la zone de confort. Ce travail montre que la technique traditionnelle de toiture terrasse du Ksar de Béni Isguen est une référence d'adaptation aux conditions climatiques locales.

3.2.1.3. Ksar de Béchar

Le patrimoine ksourien de Béchar est une des composantes importantes du patrimoine national caractérisé par son architecture bioclimatique et sa pérennité face aux risques physiques et humains (Fig.3.4).

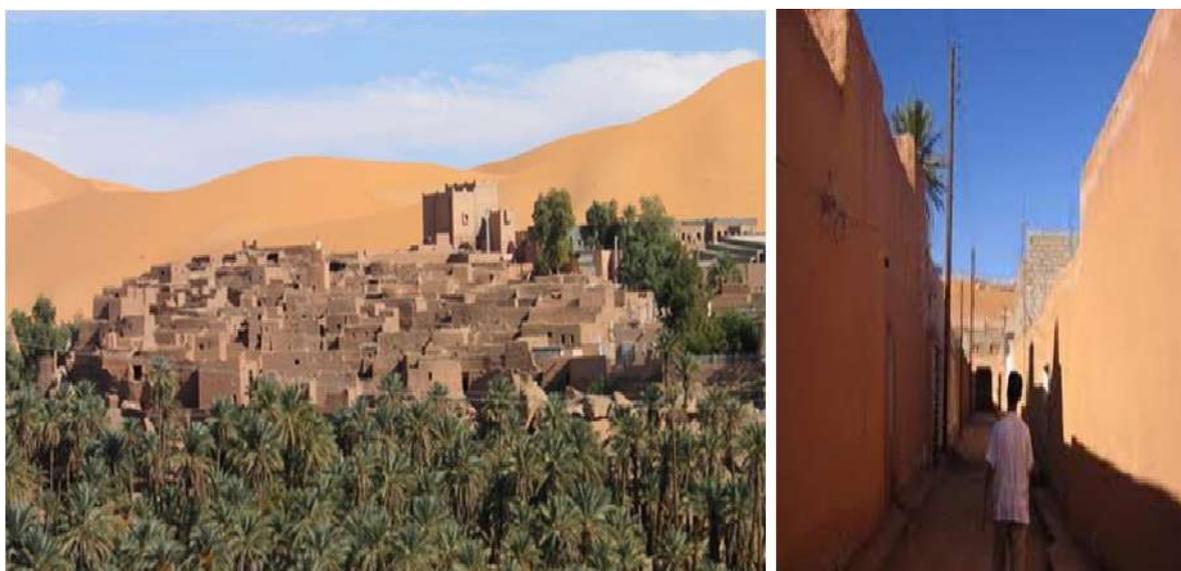


Fig.3.4. Ksar de Béchar (Makhloufi et al., 2021)

Fezzioui et al. (Fezzioui et al., 2008) ont cerné les caractéristiques d'une maison située au Ksar de Kenadsa (Béchar) du point de vue des matériaux de construction (adobe), de la typologie du plan, la manière d'habiter. Du point de vue climatique et comparativement aux constructions modernes, les constructions traditionnelles du Ksar de Kenadsa fournissent un vrai enseignement sur les diverses techniques de conception architecturale qui s'adaptent au climat local et qui par conséquent créent un environnement confortable aussi bien à l'échelle urbaine qu'à l'échelle de la cellule.

Khoukhi et Fezzioui (Khoukhi & Fezzioui, 2012) ont évalué expérimentalement le confort thermique d'un logement moderne avec un logement traditionnel situé dans Ksar de Kenadsa. Une analyse comparative a été réalisée par simulation thermique et dynamique à

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

l'aide du logiciel TRNSYS. Les résultats obtenus par simulation montrent que la maison typique moderne semble inadaptée au climat désertique. En effet, hormis l'utilisation de la climatisation en été, il n'y a pas d'autre solution qui puisse assurer le confort thermique, par contre le logement traditionnel a été construit pour atteindre le confort thermique en saison chaude.

Benyoucef et Dionisovich (Benyoucef & Dionisovich, 2013) ont montré que l'organisation traditionnelle des maisons de Ksar de Béchar est encore considérée comme très importante pour les familles sahariennes. Les maisons à patio pourraient être aménagées de manière à contribuer à une faible consommation d'énergie, une adaptabilité climatique et une durabilité, tout en favorisant les valeurs socioculturelles.

Benslimane et al. (Benslimane et al., 2020) ont mené une étude théorique sur Ksar de Béchar et ont fait la constatation qu'utilisation de matériaux d'origine locale tels que le bois issu de palmiers, les fibres naturelles et la paille pour la construction des toits, l'adobe, le mortier d'argile et la pierre fournissent une masse thermique, indispensable à la stratégie de refroidissement passif.

Makhloufi et al. (Makhloufi et al., 2021) ont investigué expérimentalement la performance énergétique des logements traditionnels de Ksar de Kenadsa. Les résultats de cette étude ont montré que ce Ksar représente une bonne référence d'adaptation aux conditions climatiques difficiles et il apporte de bonnes solutions environnementales de conception passive à la consommation d'énergie. En plus Ksar de Kenadsa est caractérisé par son architecture bioclimatique et sa pérennité face aux risques physiques et humains. Ce patrimoine recèle une grande richesse naturelle, matérielle et immatérielle.

3.2.1.4. Ksar de Biskra

La wilaya de Biskra dispose un potentiel patrimonial et paysager important marqué par l'harmonie entre l'ensemble des composantes de la structure oasisienne, cette dernière offre un paysage naturel et architectural exceptionnel, réside dans l'ensemble des potentialités naturelles tels que la palmeraie et son agrobiodiversité, les paysages montagneux, les espaces sablonneux et les potentialités patrimoniales architecturales tels que les ksour, les gravures rupestres et les éléments du système d'irrigation (Fig.3.5).

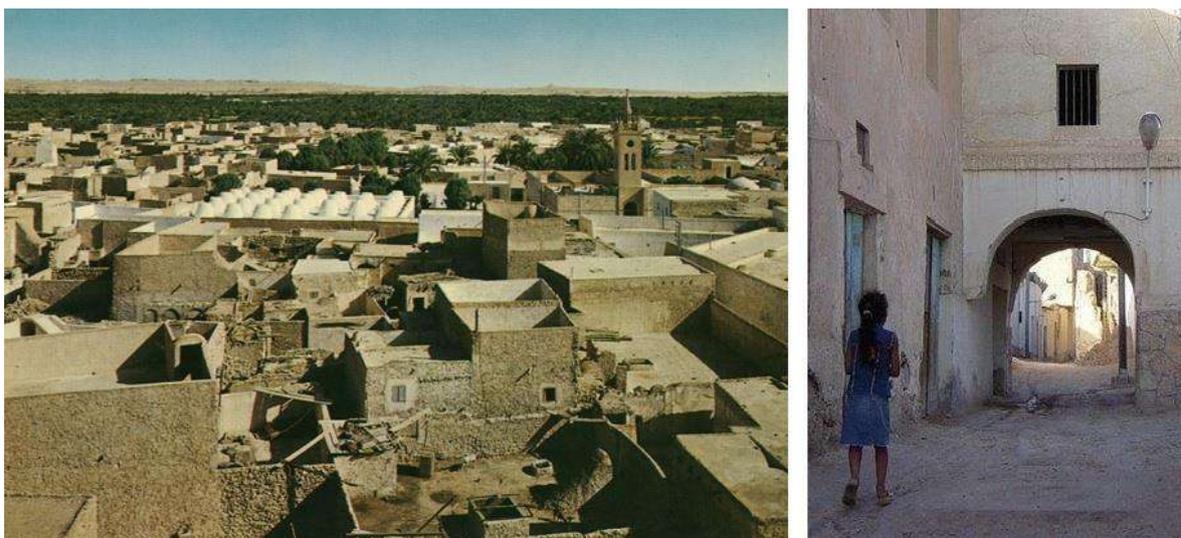


Fig.3.5. Ksar de Biskra (Djeradi, 2013)

Berghout et al. (Berghout et al., 2014) ont évalué l'impact de l'orientation d'un bâtiment collectif à Biskra, Algérie sur le confort de l'occupant, en vue de répondre à ses besoins énergétiques et de confort à un moindre coût d'une part et d'autre part, de concevoir des bâtiments collectifs plus performants du point de vue thermique et énergétique. Cette étude a porté sur la période la plus défavorable de l'année, qui est le mois de juillet. Les résultats ont démontré la relation qui lie la quantité d'énergie absorbée par la paroi à la température intérieure, qui dépend étroitement de l'orientation. Selon l'analyse effectuée, l'orientation favorable au contrôle du confort thermique et à la diminution de la demande énergétique est le Sud pour ce type de climat. Par contre, l'orientation Nord est à éviter. Quant aux orientations Est et Ouest, le déficit se situe à 45%, ce qui est du même ordre de grandeur que les résultats de Givoni (1978).

Hadagha et al. (Hadagha et al., 2017) ont opté une approche expérimentale, et s'appuie essentiellement, d'une part, sur une simulation numérique en utilisant le logiciel Ecotect et d'autre part, une analyse comparative multicritère entre trois modèles d'habitat appartenant aux trois périodes importantes qui ont marqué l'histoire de la ville de Biskra, est effectuée pour démontrer les rôles multiples de ce dispositif architectural. Les résultats de la simulation ont montré que la maison traditionnelle prouve efficacement son rôle climatique, en vue que les courbes de représentation s'installent dans la zone de confort pendant tous les jours de mesure, donc, c'est une maison confortable à la longueur de toute l'année.

Latreche et Sriti (Latreche & Sriti, 2018) ont évalué l'influence des paramètres propre à l'enveloppe (les murs, la toiture, les fenêtres, etc...) sur la consommation

énergétique et le confort thermique dans un habitat individuel à Biskra. Des tests de simulation ont été effectués à l'aide du logiciel TRNSYS durant la période de surchauffe. Les résultats de l'étude paramétrique ont montré qu'il est possible d'améliorer la performance thermique et énergétique de ce type d'habitat tout en préservant l'essentiel de ses spécificités, de même qu'un mauvais choix effectué au niveau des éléments de l'enveloppe peut entraîner des dépenses énergétiques excessives pour assurer le confort hygrothermique optimal pour les occupants.

Sedira et Mazouz (Sedira & Mazouz, 2018) ont testé l'influence de la morphologie urbaine du ksar du village rouge de la wilaya de Biskra en Algérie sur les conditions climatiques extérieures et le microclimat urbain en traitant des aspects quantitatifs du confort thermique extérieur. Dans cette étude ont corrélé la géométrie de la rue, son orientation avec l'évolution des variables physiques : température de l'air, température radiante moyenne, l'humidité relative et la vitesse du vent. Les résultats ont montré que les rues étroites et couvertes, aux orientations nord-sud, nord-ouest et sud-est, offrent un meilleur ombrage par les bâtiments, souhaitable dans cette région en été, pour les piétons sur les trottoirs que sur les rues larges, pour assurer l'équilibre thermique humain et garanti un niveau de confort thermique, et la protection contre l'exposition solaire est l'objectif le plus important lié aux rues.

3.3. Concepts de construction souterraine

Les bâtiments souterrains offrent de nombreux avantages. En fait, l'utilisation de la construction souterraine est assez étendue (Goel et al., 2012). Par conséquent, il est courant d'organiser les bâtiments souterrains en diverses catégories telles que la fonction, l'utilisation et la typologie de conception. Il existe une grande variété d'approches dans le concept de construction souterraine. D'une part, un bâtiment peut être érigé sur la surface d'origine du sol (c'est-à-dire au niveau du sol), puis être recouvert de terre pour abriter partiellement ou complètement le bâtiment. D'autre part, le bâtiment est construit sur un site complètement excavé (c'est-à-dire en sous-sol).

Entre les deux, il existe plusieurs autres types de concepts de bâtiments souterrains qui peuvent être distingués comme le montre la figure.3.6, cela n'inclut pas toutes les possibilités de conception, mais donne un aperçu typologique (Chris Van Dronkelaar & Physics, 2013).

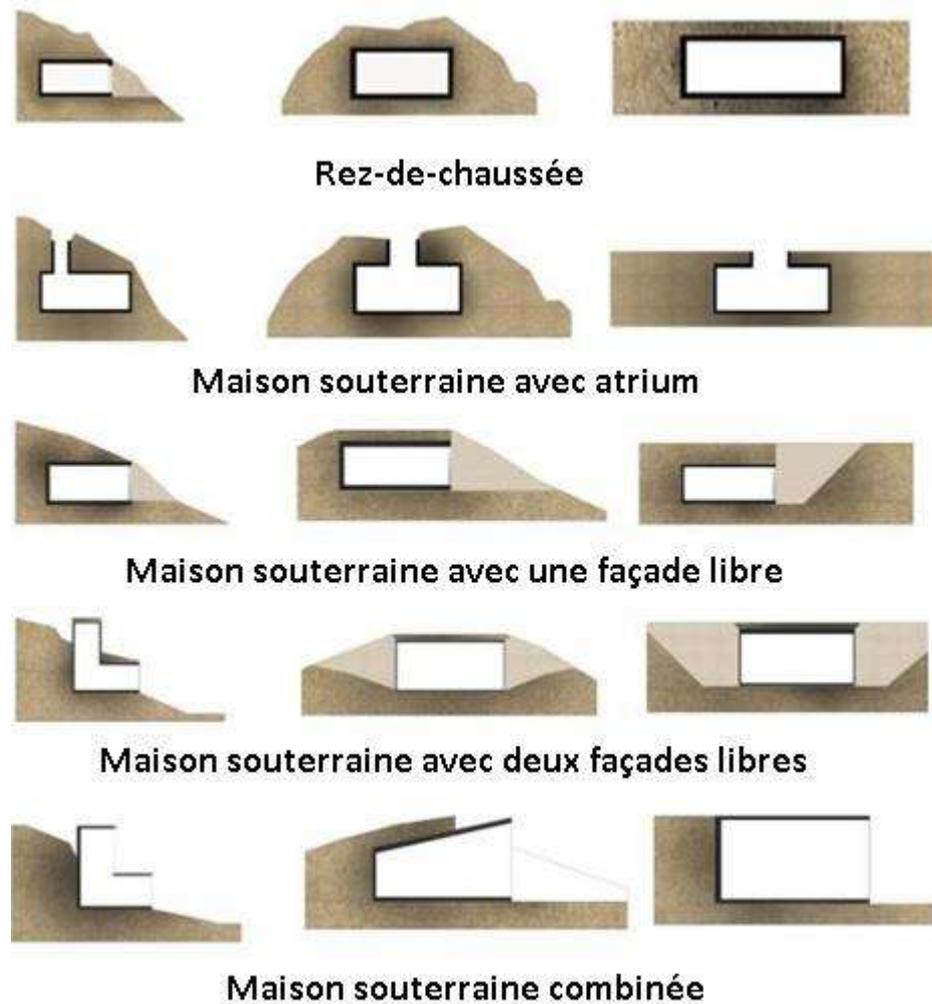


Fig.3.6. Classification du bâtiment souterrain (Prevlukaj et al., 2018)

En utilisant cette classification, une évaluation peut être faite sur leur efficacité de réduction d'énergie tout en maintenant la qualité de l'environnement intérieur. Par exemple, une réduction d'énergie plus élevée peut être obtenue avec un bâtiment entièrement souterrain, mais cela rend plus difficile le maintien de la qualité de l'environnement intérieur. La relation entre le concept de bâtiment souterrain et ces deux facteurs dépend également fortement de la fonction du bâtiment et du climat dans lequel le bâtiment existe.

3.4. Histoire de la construction souterraine

Dans les temps anciens (~ 3000 avant notre ère), les bâtiments souterrains étaient utilisés comme abris contre les menaces naturelles et les attaques d'animaux, et comme espaces pour fournir de la chaleur, etc (Alkaff et al., 2016). À cette époque, des bâtiments souterrains existaient sous la forme d'habitations troglodytiques (Goel et al., 2012).

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Certaines des premières habitations et maisons souterraines ont pu être vues dans le monde. Par exemple la préfecture de Miyagi au Japon, le village indien de Mesa Verde au Colorado, les maisons troglodytes de Yaodong en Chine, le rocher de Kandovan en Iran, les maisons minées de Coober Pedy en Australie, les villes souterraines en Turquie, en Iran et en Ecosse, la grotte Guadix en Espagne, les habitations Sassi di Matera en Italie, les maisons souterraines traditionnelles en Grèce et en Tunisie, les habitations et maisons troglodytes en Turquie et en Iran, et enfin le Cachemire souterrain en Inde (Chris Van Dronkelaar & Physics, 2013; Goel et al., 2012; Prelvukaj et al., 2018). Comme on le voit, la plupart des modèles anciens mentionnés ci-dessus sont situés dans des pays arides.

La ville souterraine de Matmata en Tunisie est une ville réputée pour ses maisons traditionnelles typiques, des habitations qui ont été restaurées dans les roches argileuses molles souterraines, offrant aux habitants un confort climatique incomparable, et ce, en bordure du Sahara torride en Tunisie (Fig.3.7). La plupart des habitations anciennes étaient construites autour de cours centrales. Ils sont creusés autour d'un grand puits circulaire ouvert pour permettre à la lumière du soleil d'entrer dans les pièces pendant la journée, et ventiler l'air, ainsi que pour maintenir une température relativement stable tout au long de l'année 15 °C en janvier et 25 °C en juillet.



Fig.3.7. Maison souterraine à Matmata, Tunisie (Elwerfalli, 2016)

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

La nature de la terre dans la région montagneuse et la présence de pentes, de collines et de vallées avaient fait des habitations souterraines un modèle de construction répandu. Pendant des siècles, les habitants de Gharyan en Libye (Fig.3.8) ont creusé dans le calcaire pour fabriquer des maisons souterraines à la main en utilisant uniquement des outils simples et fabriqués localement tels que des pelles et des pioches.



Fig.3.8. Maison souterraine à Gharyan, Libye (Elwerfalli, 2016)

Plus de dix millions de personnes vivent dans des habitations souterraines construites dans un sol argileux en Sanmenxia, Chine (Fig.3.9), la terre est utilisée à la fois pour l'agriculture et la vie. Ces maisons offrent des conditions parfaites, car elles sont chaudes en hiver et fraîches en été avec des températures comprises entre 10 et 20 °C.



Fig.3.9. Logements troglodytiques dans la ville de Sanmenxia, Chine (Audi, 2016)

Une ville de Turquie connue sous le nom de Cappadoce, située dans un climat montagneux, comme des bâtiments rocheux et des habitations souterraines, c'est une structure complexe qui combinait à la fois des bâtiments rocheux et souterrains, et des pièces souterraines ont été sculptées dans la montagne sur des roches en partie tendres en raison de la pénurie de bois et d'autres bons matériaux de construction (Fig.3.10). Alors que l'autre partie est formée dans la montagne. Les abris souterrains offrent une température stable et favorable sont d'environ 12 à 15 °C par temps froid de l'hiver.

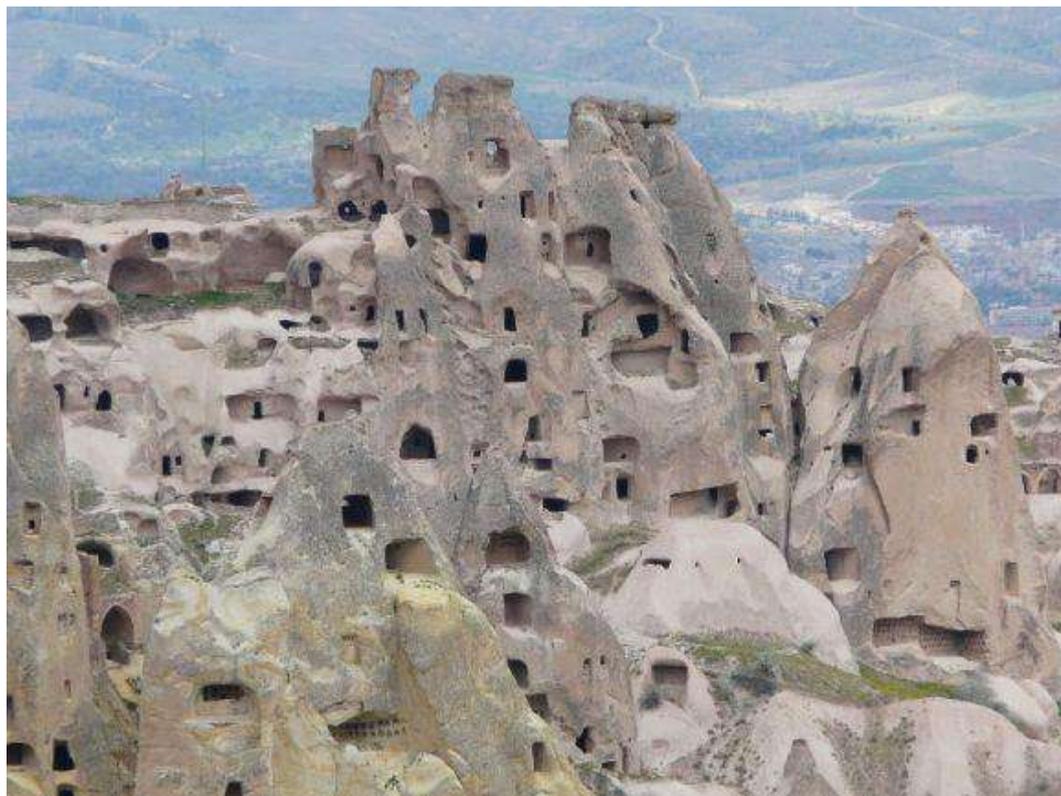


Fig.3.10. Habitations troglodytiques en Cappadoce, Turquie (Audi, 2016)

En effet, la présence d'habitations souterraines habitées dans le monde aujourd'hui a prouvé que ces habitations peuvent offrir des conditions de vie extrêmement confortables avec une température stable. Ainsi, certains pays du monde ont déjà commencé à développer des constructions souterraines, pour s'adapter aux conditions climatiques sévères. De nombreux exemples frappants pourraient être cités à ces importantes constructions anciennes.

L'étude des constructions souterraines est répandue dans le monde. Bien qu'il y ait eu de nombreuses recherches menées sur les constructions souterraines telles que (Nang et al., 2019; Qihu, 2016; Z Tan et al., 2020), peu d'entre elles comportent des bâtiments résidentiels en particulier dans les régions chaudes. Cela montre l'importance de cette étude.

Van Dronkelaar et al. (C. Van Dronkelaar et al., 2014) ont conclu dans leur étude sur les bâtiments souterrains dans différents climats que les bâtiments souterrains ont le potentiel de réduire la demande d'énergie par rapport à un bâtiment conventionnel en surface, en utilisant des températures du sol bénéfiques et de grandes quantités de couverture de terre comme isolation. Cependant, l'ampleur de ce potentiel est liée à la combinaison de divers éléments de conception. L'équilibre entre la température du sous-sol et les gains internes est très important pour obtenir une réduction énergétique élevée.

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Dans une étude menée par **Shan** (Shan et al., 2017) à Singapour, les travaux ont montré que le confort thermique intérieur était amélioré ainsi que la résistance au bruit extérieur. En revanche, les restrictions de lumière naturelle, le coût de construction et les problèmes psychologiques dus à l'isolement font partie des inconvénients des constructions souterraines dans les bâtiments résidentiels.

Shi et al. (Shi et al., 2018) ont étudié l'influence de la performance thermique globale des enveloppes de bâtiments souterrains sur la consommation d'énergie annuelle pour diverses zones climatiques en Chine en utilisant le DeST (the Designer's energy Simulation Toolkit). Il a été constaté que la consommation annuelle d'énergie dépendait du coefficient de transfert de chaleur global des enveloppes des bâtiments et les coefficients de transfert de chaleur optimaux ont été recommandés pour diverses zones climatiques en Chine.

Milanović et al. (Milanović et al., 2018) ont étudié la conception d'une maison abritée de la terre dans le village de Dobraca près de Kragujevac, en Serbie, dans le contexte du développement et de certaines propriétés thermiques du logement souterrain. Les résultats ont montré que les maisons souterraines sont encore aujourd'hui plus efficaces thermiquement que les maisons au-dessus du sol car, outre de la terre, il n'y a pas besoin de nouvelles couches thermiques supplémentaires. L'étude des structures d'habitation souterraines donne un aperçu de la relation entre la localisation et la typologie des habitations souterraines selon les zones climatiques. Ces structures ont une température presque constante, ce qui constitue la principale condition de « confort » dans laquelle l'homme est déterminé à vivre. Dans la zone climatique tempérée, l'entrée orientée vers l'est est l'un des facteurs influents pour maintenir la température en dessous de 21 °C pendant l'été, même si la température extérieure est supérieure à 35 °C.

Un bon système de ventilation est essentiel pour qu'un habitat souterrain offre un environnement confortable avec une meilleure qualité de l'air intérieur. Les puits de ventilation sont largement utilisés à des fins de ventilation dans un habitat souterrain (Mukhtar et al., 2018).

Zheng Tan et al. (Zheng Tan et al., 2018) ont étudié les conditions de confort thermique dans les constructions souterraines sans chauffage ni refroidissement dans quatre grandes villes chinoises (Pékin, Shanghai, Nanjing et Fuzhou), et ont estimé le potentiel d'économie d'énergie pendant les saisons de transition. Les résultats indiquent que le climat local et en particulier le taux d'humidité est un facteur clé affectant le comportement thermique des structures souterraines. De plus, la conception optimisée répond aux critères de température de confort et de conception recommandés pour un habitat souterrain à

ventilation naturelle. Dans l'ensemble, cette étude constate que l'analyse statistique est un outil utile pour l'amélioration du taux de ventilation et du confort thermique.

Porras-Amores et al. (Porras-Amores et al., 2019) ont évalué le comportement de la ventilation thermique et naturelle dans une construction souterraine et ont expliqué le comportement passif des éléments du bâtiment (tunnel, cheminée et grotte) à différentes périodes de l'année. Les modèles CFD développés dans cette étude prennent en compte les gradients de température du terrain, ce qui a permis une simulation plus réaliste de la ventilation naturelle dans les constructions souterraines. Les résultats montrent que la stabilité thermique avec une consommation d'énergie nulle est atteinte dans la grotte malgré les températures extérieures extrêmes. De plus, le tunnel d'accès est l'élément clé de la ventilation de la construction souterraine, où la température du sol joue un rôle essentiel dans la régulation de la ventilation naturelle. En revanche, la cheminée de ventilation joue un rôle moins important en raison des vitesses d'air plus faibles.

Bakoosh (Bakoosh, 2019) a comparé par les mesures expérimentales les performances thermiques, l'impact environnemental, la consommation d'énergie et les matériaux de construction dans les maisons souterraines et les logements de style moderne au-dessus du sol en Libye au cours de la période hivernale. Les résultats ont montré que la maison souterraine a une température et une humidité moyennes intérieures de 16,12 °C et 62,15% tandis que l'autre maison le type à une température et une humidité de 12,6 °C & 70,13% respectivement. En outre, on peut dire que les maisons souterraines ont plusieurs avantages sur les maisons modernes comme l'utilisation de matériaux de construction écologiques locaux et des techniques de construction simples pour fournir le confort thermique et des températures presque constantes à l'intérieur de la maison en hiver et l'été. Cela signifie que les maisons souterraines ont le refroidissement et le chauffage passifs, où elles répondent aux besoins des occupants.

Alwetaishi et al. (Alwetaishi et al., 2021) ont montré dans leur étude menée une véritable salle souterraine dans la ville d'Al-Dwadimi en Arabie saoudite que l'utilisation des constructions souterraines dans les régions chaudes peut être favorisée par une ventilation naturelle qui peut abaisser la température intérieure de 3 °C en été.

Guedouh et al. (Guedouh et al., 2021) ont évalué l'environnement thermique d'un ancien bâtiment souterrain à la commune de Bitam (w) Batna, Algérie. Des campagnes de mesures annuelles ont été menées pour les saisons d'été et d'hiver à l'aide d'une instrumentation numérique multifonctions. Les résultats de mesures et de simulation ont montré que le bâtiment souterrain est une solution bioclimatique en région chaude et aride ;

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

l'avantage de la terre représente un isolement parfait de l'ensemble des conditions climatiques hostiles du désert, en particulier pour l'environnement thermique. Ce type de bâtiment est une stratégie passive d'un potentiel thermique élevé en zone chaude et aride, qui peut offrir un contrôle thermique adéquat pour les espaces intérieurs et économiser de l'énergie.

3.5. Avantages et inconvénients de la construction souterraine

a) Avantages

- Les maisons souterraines offrent une protection contre les conditions météorologiques extrêmes comme les vagues de chaleur et de froid, les vents forts et les tempêtes de poussière et de sable.
- La terre étant un isolant naturel, elle garde les maisons chaudes en hiver et froides en été. Cela réduit les besoins énergétiques de la maison, en particulier dans les zones chaudes.
- En raison de la température constante des maisons souterraines, les coûts énergétiques ont été considérablement réduits.
- Ces maisons nécessitent peu ou pas d'entretien extérieur, comme repeindre, réduisant ainsi les coûts d'entretien.
- Ces maisons offrent moins d'opportunités pour les insectes et autres parasites, en raison du plus petit nombre d'ouvertures.
- Ces maisons sont presque à l'abri des voleurs par rapport aux maisons traditionnelles, car un seul côté de la maison doit être protégé.

b) Inconvénients

- Ces maisons sont inhabituelles et nécessitent une planification minutieuse.
- La construction de telles maisons nécessite des procédures complexes de ventilation, d'éclairage et de construction.
- Le grand coût de construction.

3.6. Construction souterraine moderne

Les bâtiments souterrains dans les temps anciens étaient principalement construits à des fins de vie et de sécurité sans tenir compte de la demande en énergie. Cependant, à l'ère moderne actuelle, le développement du sous-sol du bâtiment est l'une des stratégies pour

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

promouvoir les bâtiments basse consommation et pour offrir de meilleurs modes de vie aux occupants (Goel et al., 2012). Depuis le 19^e siècle, le sous-sol a été dévolu aux ouvrages techniques en même temps qu'il est devenu le lieu de l'excellence technique et le domaine des ingénieurs (Labbé, 2016).

Le 20^e siècle est marqué par des avancées technologiques en matière de construction souterraine et de géotechnique. Cela concerne par exemple l'introduction du béton armé dans le domaine de construction, le creusement en sol meuble, la création d'espaces souterrains ouverts avec le minimum d'affaissement du terrain adjacent, le creusement de grands volumes souterrains. Ces avancées ont permis le développement de l'espace souterrain dans des villes denses en parallèle de leur croissance démographique (Bobylov, 2009).

La Villa Flower Petals située à Bolton, au Royaume-Uni, est une villa souterraine rurale et écologique a été construite sous une colline (Fig.3.11). La conception familiale de quatre chambres et de plain-pied sert de résidence moderne équipée de la haute technologie. La villa produit de l'électricité grâce à l'énergie éolienne et solaire et exploite le système de chauffage avec des pompes. En conséquence, il y a une réduction des émissions de carbone et une conservation accrue de l'environnement contrairement aux maisons conventionnelles qui sont construites en briques et en béton dans la construction (Beverly, 2012).



Fig.3.11. Villa Flower Petals, Bolton, Royaume-Uni (Beverly, 2012)

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Une autre incroyable villa à Vals en suisse (Fig.3.12) est parfaite pour l'emplacement, car elle est très proche des bains, et ne bloque pas les magnifiques vues sur la montagne. De plus, comme il est presque entièrement souterrain, il ne coûte presque rien de chauffer en hiver ou de refroidir en été (Beverly, 2012). Dans la partie introductive de la villa, il y a une cour centrale qui est entourée d'une grande façade formée par de grandes ouvertures de fenêtres qui offrent des reflets lumineux de la vue alpine de l'autre côté de la vallée étroite.



Fig.3.12. Villa souterraine à Vals, Suisse (Beverly, 2012)

Broere (Broere, 2016) a confirmé que la mise en place d'infrastructures et d'autres installations souterraines offre une opportunité de réaliser de nouvelles fonctions dans les zones urbaines sans détruire le patrimoine ni affecter négativement l'environnement de surface, et offre en même temps des opportunités d'amélioration à long terme de l'impact environnemental des villes et une utilisation plus efficace de l'espace et Ressources. Ces avantages sont là pour les villes existantes en réaménagement, mais peuvent être mis en œuvre pour les villes nouvellement en développement plus facilement et de manière plus rentable, pour des avantages encore plus importants.

La conception bioclimatique moderne introduit la construction souterraine comme une solution passive afin de répondre aux exigences du confort thermique et à la problématique d'efficacité énergétique et économie d'énergie toute en préservant l'environnement des risques (pollution et réchauffement climatique, etc.).

Chapitre 3 : État de l'art sur la construction vernaculaire et souterraine

Connaître les bénéfices que peut apporter la construction souterraine est un premier pas vers une utilisation systématique de la construction souterraine en milieu urbain.

3.7. Les nouveaux enjeux de la construction souterraine

Dans le secteur du bâtiment, la construction souterraine devrait occuper le devant de la scène dans les prochaines années. L'apparition de nouvelles technologies a rendu possible de nombreuses avancées en matière de fiabilité des travaux souterrains et de réduction du temps de construction (Guilloux, 2016).

L'immeuble multifonctionnel de « Earth-Scraper » de Mexico (Fig.3.13) se présente sous la forme d'une pyramide inversée. Il plongerait sous la place Zocalo, l'une des plus vastes du monde, au cœur du quartier historique de la capitale mexicaine. Il s'enfonce sur 65 niveaux et accueillerait des commerces, des bureaux, des logements et un musée sur la civilisation aztèque. À sa base, située sur la place, un plancher de verre permet d'avoir une vue plongeante et transparente sur l'ensemble de la structure.

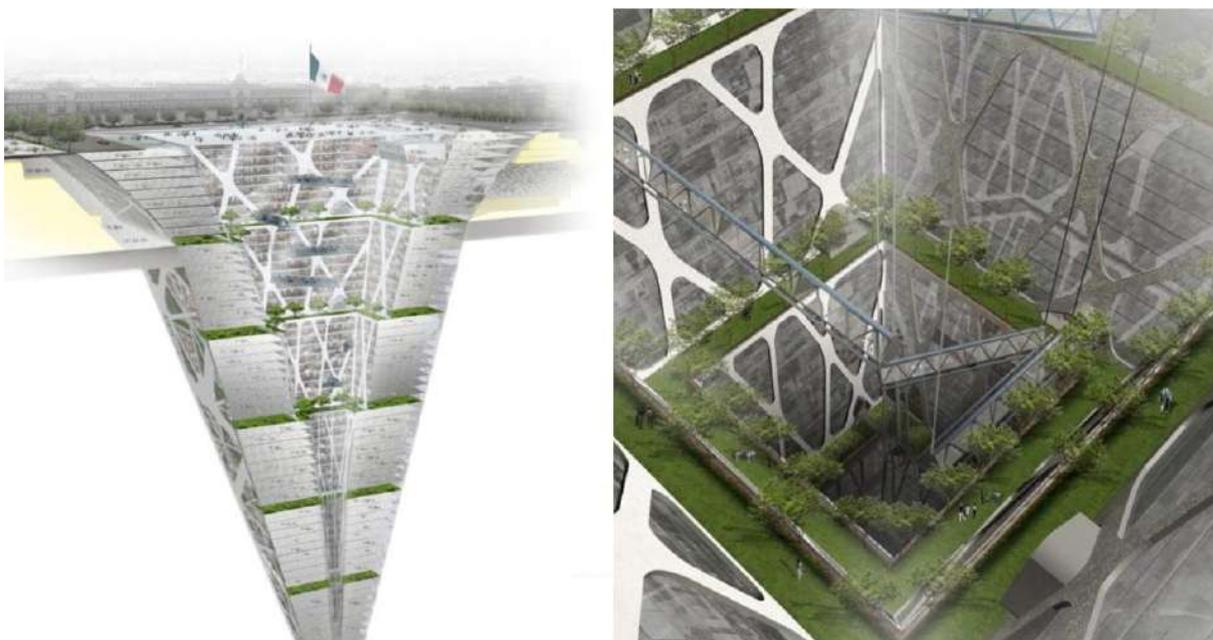


Fig.3.13. Vision souterraine du "gratte-terre" dans la ville de Mexico (Audi, 2016)

3.8. Conclusion

L'architecture vernaculaire a démontré sa parfaite adaptation environnementale à travers son développement empirique et son amélioration par des générations d'occupants. Cet habitat a été développé en relation étroite entre les besoins fonctionnels des occupants, la culture, le climat et d'autres aspects de l'environnement de vie.

L'étude bibliographique adoptée dans ce chapitre a montré que les Ksour ont prouvé leurs qualités environnementales et socioculturelles. Malheureusement cette typologie d'habitation est en train de disparaître et est remplacée par d'autres habitations utilisant des méthodes et des matériaux de production contemporains.

La construction souterraine dans les régions chaudes au monde et en Algérie en général et la région Sud en particulier présente des grands potentiels ce qui permet une assurance du confort thermique acceptable sans consommation ou avec peu de consommation d'énergie ce qui assure une efficacité énergétique et une réduction des émissions de polluants et des gaz à effet de serre.

CHAPITRE 4

Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

4.1. Introduction

Plus de 99 % de la masse de la Terre est à une température de plus de 1000 °C. Seule 0,1 % de la masse de la Terre (c'est-à-dire les trois premiers kilomètres) est plus froide que 100° C. À la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0,065 Watt. Cette chaleur dégagée n'a pas pour origine principale le refroidissement du globe terrestre, mais provient à 90 % de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) contenus dans les minéraux de la croûte. L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait. La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe (Battaglia et al., 2014).

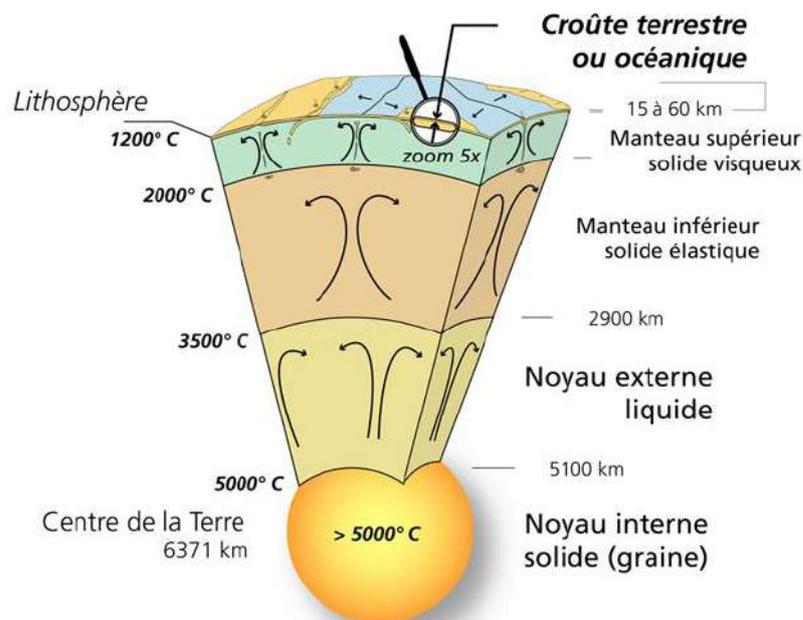


Fig.4.1. Origine de la chaleur de la Terre (Battaglia et al., 2014)

Le profil vertical de la température du sol à différentes profondeurs est l'un des principaux moyens de quantifier et d'exploiter les techniques de chauffage ou de refroidissement par le sol pour le conditionnement des bâtiments. Dans ce chapitre une étude expérimentale a été menée sur un site sis à Ouargla (Sud/Est de l'Algérie), pour mesurer le profil vertical de la température du sol, à partir de la surface du sol jusqu'à une profondeur de 2 mètres.

4.2. Géothermie

Le terme « géothermie » est formé à partir des mots grecs « Géo : la Terre » et « Thermos : chaud ». Il recouvre l'ensemble des techniques qui permettent de récupérer la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, en particulier dans les aquifères (réservoirs rocheux renfermant des eaux souterraines). Cette énergie calorifique provient en part à peu près égale de la chaleur résiduelle produite par les phénomènes de formation de la planète (il y a 4,5 milliards d'années) et de la radioactivité naturelle.

4.2.1. Types de la géothermie

La géothermie est la science qui s'intéresse à l'exploitation de la chaleur naturelle de la terre emmagasinée dans la croûte terrestre. Elle est classée en quatre principaux types en fonction de la température de la source thermique.

4.2.1.1. Géothermie haute énergie

Concerne l'exploitation des gisements profonds situés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, dont la température est supérieure à 150 °C. Elle est rencontrée dans les régions géologiquement actives (zones volcaniques ou sismiques). Le fluide géothermique (vapeur sèche ou humide) est pompé du réservoir géothermique profond vers la surface pour être exploité dans la production d'électricité. Ce type de géothermie n'existe pas en Algérie (Salima Ouali, 2019).

4.2.1.2. Géothermie basse énergie

Concerne l'exploitation des gisements situés dans des bassins sédimentaires entre 1500 et 2500 mètres de profondeur, dont la température varie entre 30 et 90 °C. Elle est utilisée dans le chauffage d'habitations et certaines applications industrielles. Elle peut être utilisée au Sahara septentrional algérien (Ouargla, Ghardaïa, Biskra) (Salima Ouali, 2019).

4.2.1.3. Géothermie très basse énergie

Concerne l'exploitation de la chaleur du sous-sol ou des aquifères superficiels de 0 à 600 mètres de profondeur, dont la température est inférieure à 30 °C. Elle est principalement utilisée pour le chauffage/climatisation et l'alimentation en eau chaude sanitaire. La technique se base sur l'ajout d'une pompe à chaleur associée à des capteurs ou forages. Elle peut être utilisée en partout dans le monde notamment en Algérie (Salima Ouali, 2019).

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

4.2.1.4. Géothermie roche chaude sèche (Hot Dry Rock)

La technique se rapporte à la production artificielle de l'énergie géothermique à partir des roches sèches profondes (ex-granites). Le principe consiste à injecter de l'eau froide sous forte pression dans un forage d'injection. En profondeur, l'eau qui va élargir les fissures dans le massif rocheux par infiltration, va aussi se réchauffer au contact de la roche. L'eau réchauffée est, par la suite, remontée en surface par un puits de production pour être envoyée dans une centrale de production d'électricité. Ce type de géothermie est toujours à l'état expérimental et n'existe pas en Algérie (Salima Ouali, 2019).

4.2.2. Gradient géothermique

La température des roches augmente avec la profondeur, c'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Il varie selon les couches traversées. Le gradient géothermique observé dans la croûte continentale varie largement d'un endroit à un autre, bien que la valeur normale soit de l'ordre de $3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$, néanmoins certaines régions enregistrent plus de $100\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ comme c'est le cas à Larderello (Italie), alors que d'autres sites ne dépassent pas $1\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ comme c'est le cas pour Padoue (Italie).

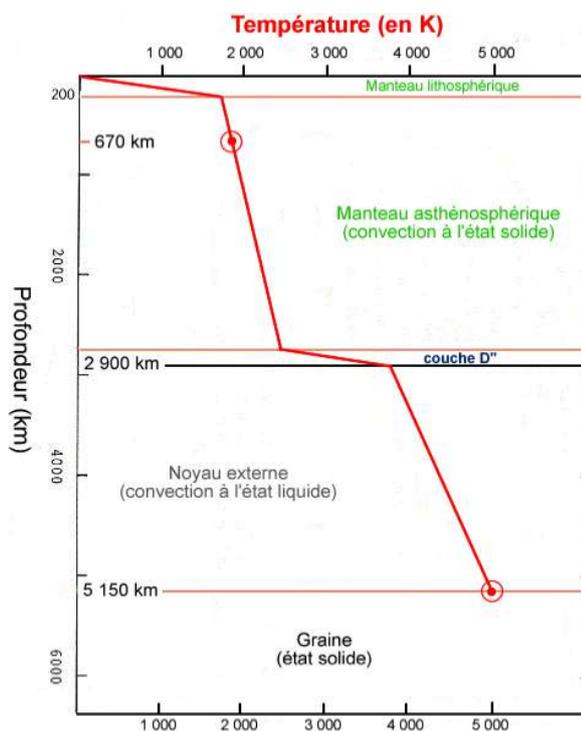


Fig.4.2. Évolution de la température en fonction de la profondeur (Salima Ouali, 2019)

4.2.3. Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

L'énergie géothermique repose généralement sur le fait que la température du sous-sol est plus chaude qu'à la surface en hiver, et plus froide en été. C'est une conséquence du fait que les couches superficielles de la Terre sont chauffées et refroidies beaucoup plus facilement que l'intérieur, qui est maintenu à une température constante tout au long des saisons. Cependant, l'utilisation de l'énergie géothermique implique certains avantages et inconvénients :

a) Avantages de l'énergie géothermique

- C'est l'énergie la plus efficace de toutes les énergies renouvelables. La quantité d'énergie thermique perdue en transportant la chaleur du fond du puits à la surface est minime.
- L'énergie géothermique reste stable tout au long des différentes saisons de l'année. La source de chaleur étant de plusieurs mètres sous terre, l'inertie thermique est très élevée. La terre ci-dessus a une fonction isolante qui empêche les transmissions thermiques. L'effet est similaire à celui d'une grotte où la température est pratiquement constante tout au long de l'année.
- C'est une source qui peut être trouvée n'importe où sur Terre, contrairement à ceux qui dépendent des dépôts. Néanmoins, il existe des sites plus favorables que d'autres. Par exemple, dans les zones volcaniques, la température dans le sous-sol est facilement plus élevée.
- Elle est indépendante des variations météorologiques. C'est une différence importante en ce qui concerne l'énergie solaire. Peu importe si le temps est nuageux, s'il pleut ou si les marais liés à l'énergie hydraulique sont pleins ou vides.
- Elle peut être utilisée d'une manière particulière, par exemple dans des maisons isolées où l'électricité n'arrive pas. Dans le cas des maisons unifamiliales, en fournissant une température constante toute l'année près de 15°, l'énergie géothermique peut être utilisée pour refroidir l'environnement.

b) Inconvénients de l'énergie géothermique

- Elle est plus difficile à installer en particulier dans les grandes villes. L'inconvénient des villes est que le sous-sol appartient à la mairie et est occupé par d'autres services tels que les canalisations d'égout, le gaz et l'électricité, etc.

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

- Pour réaliser un projet d'installation d'énergie géothermique, il est nécessaire d'effectuer des études préalables. Ces études nécessitent des machines spécifiques et des investissements importants dans la phase initiale du projet.
- Utilisation locale seulement. Elle ne peut pas être transportée comme source principale de chaleur, elle doit être consommée au même endroit d'où il provient.

4.2.4. La géothermie en Algérie

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Énergies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la Sonatrach.

Les études en géothermie ont été menées principalement dans le Nord algérien. Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire Nord Algérien, majoritaires au Nord-Est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence, au Nord-Ouest, Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois algérien (S Ouali & Baddari, 2006).

Le Sahara algérien présente dans son ensemble un gradient géothermique moyen de l'ordre de 4 °C / 100 m. Dans la partie septentrionale du Sahara, le gradient géothermique est de l'ordre de 3 °C / 100 m. Ce dernier pourrait être dû uniquement à l'effet de la profondeur.

Une forte anomalie géothermique est bien mise en évidence dans la partie occidentale du Sahara dans les régions de Béchar, Beni Abbès et Timimoun. La figure 3.4 montre que cette zone est anormalement chaude, où le gradient atteint plus de 6 °C / 100 m. Il est probablement dû à la tectonique intense qu'a connue la partie occidentale de la plateforme saharienne durant l'orogénèse hercynienne. (S Ouali & Baddari, 2006)

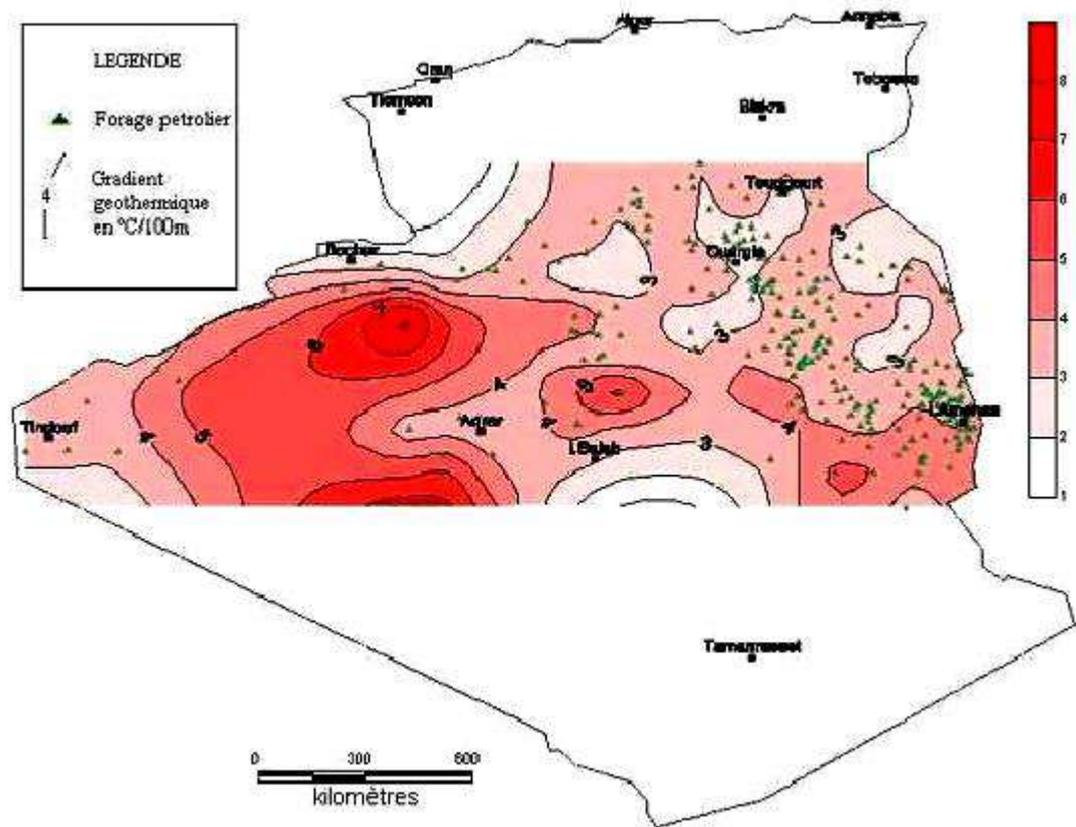


Fig.4.3. Carte de gradient géothermique du Sud algérien (S Ouali & Baddari, 2006)

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques. La disponibilité d'autres ressources énergétiques et le coût élevé des opérations d'exploration sont probablement les principales raisons qui ont empêché le développement et la valorisation de cette énergie.

4.3. Modélisation de la température du sol

La température du sol constitue une donnée essentielle pour l'étude de divers projets de construction souterraine. Comme la conservation de l'énergie se révèle de plus en plus nécessaire, les données sur la température du sol sont un aspect important du calcul des besoins énergétiques, par exemple pour déterminer les pertes de chaleur dans les sous-sols ainsi que pour examiner la possibilité d'utilisation du sol comme source de chaleur ou de froid.

Le sol a le potentiel de servir de source de chauffage et refroidissement pour les bâtiments. Cependant, l'indisponibilité des données concernant le comportement thermique

du sol a limité la généralisation des systèmes de refroidissement souterrains. Ces dernières années, le concept a commencé à obtenir une attention en raison des résultats de certaines études indiquant que le développement de tels systèmes pourrait présenter une alternative pour le refroidissement et la ventilation naturelle des bâtiments.

4.3.1. Distribution du champ de températures dans le sol

4.3.1.1. Facteurs influant la température du sol

La distribution de la température du sol à la surface et dans les zones peu profondes sont connues pour être affectées par un certain nombre de facteurs (Chow et al., 2011). Le profil de température vertical du sol est directement affecté par :

- **Nature et type de sol** : sol sableux, sol limoneux-sableux, sol rocheux, etc.
- **Propriétés physiques** : composition des couches, nature de chaque couche (sable, roches, etc.), épaisseur des couches, taux d'humidité, etc.
- **Propriétés thermiques du sol** : inertie thermique, conductivité thermique, diffusivité thermique, etc.
- **Conditions climatiques de la région** : rayonnement solaire, température et humidité de l'air, vent, taux des précipitations.
- **Couverture du sol** : la couverture du sol influe directement sur la température du sous-sol (béton, espaces verts, forêts (arbres), etc.).
- **Activité humaine** : cet effet est très limité à la nature de l'activité et pourrait faire monter la température du sol sous la surface de 1 ou 2 °C (transport, industrie, agriculture, etc.).

4.3.1.2. Relation de la conductivité thermique avec le flux de chaleur

La conductivité thermique « Lambda (λ) » d'un matériau est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à diffuser la chaleur dans les milieux sans déplacement macroscopique de matière. λ s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ou $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$. Quand le matériau considéré est homogène et isotrope, la loi de Fourier s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (4.1)$$

Où :

$\vec{\varphi}$ est la densité de flux thermique (W/m^2),

λ est la conductivité thermique ($\text{W}/\text{m K}$),

T est la température (K).

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

Dans de nombreux cas, (λ) peut être considéré comme constant (pour un milieu donné) dans un large intervalle de température. Les métaux sont les matériaux ayant la plus forte conductivité thermique (Fig.4.4).

	sec	hum.		Conductivité thermique des matériaux λ en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m ³	
	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m ³	
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m ³	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	cuivre	

Fig.4.4. Quelques valeurs de la conductivité thermique (Energie+, 2021)

Elle influe directement sur la configuration des isochaleurs. Leur évaluation peut être réalisée par deux approches différentes.

- Mesure directe par la méthode de l'aiguille chauffante en laboratoire pour quelques échantillons.
- Estimation à partir de la composition minéralogique, en tenant compte de la porosité.

Dans beaucoup d'applications courantes, on considère (λ, ρ, c) indépendantes de la température :

$$\text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

On peut donc sortir (λ) de l'opérateur div et la loi de Fourier devient :

$$\lambda \nabla^2 T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

Alors, les caractéristiques du milieu, la conductivité thermique (λ), la masse volumique (ρ) et la chaleur massique (c) n'interviennent que par le groupement :

$$a = \lambda/\rho c \quad (4.4)$$

(a) dénommé **la diffusivité**, qui s'exprime en m^2s^{-1} .

4.3.2. Comportement général des températures du sol

Afin d'évaluer la température du sol, le sol est considéré comme un solide semi-infini. La variation de la température du sol suit l'équation de conduction thermique transitoire et unidimensionnelle :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Afin d'évaluer la température du sol, plusieurs modèles mathématiques ont été développés tels que ceux de Labs (Labs, 1976), Morland (Morland & Higgs, 1978) et Kusuda (Kusuda et al., 1983). Leurs modèles présentent une solution de l'équation de transfert de chaleur d'un solide semi-infini dont la variation de la température extérieure est sinusoïdale. Le modèle semi-infini permet de calculer le champ de température pour différentes profondeurs, et ce pour différentes heures d'une journée donnée.

Le premier modèle harmonique pour estimer la température du sous-sol était présenté par Thomson en 1862 (Mihalakakou et al., 1997) et décrit comme suit :

$$T_s(z, t) = T_{s,average} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{a_s t_p}}} \cdot T_{amplitude,n} \cdot \cos \left[\frac{2\pi n}{t_p} (t - PL_n) - z \sqrt{\frac{\pi n}{a_s t_p}} \right] \quad (4.6)$$

Avec :

$T_s(z, t)$: Température inchangeable du sol à une profondeur z et temps t de l'année en °C.

$T_{s,average}$: Température annuelle moyenne du sol à différentes profondeurs et temps t en °C.

$T_{amplitude,n}$: Amplitude de l'onde de température à la surface du sol ($z = 0$), estimée égale à $\frac{1}{2}$ la différence entre le maximum et le minimum de la température mensuelle moyenne en °C.

z : Profondeur du sol en mètre (m).

t : Temps de l'année (en jours) qui commence le premier janvier.

t_p : Période du cycle 365 de la température du sol, en jours.

a_s : Diffusivité thermique du sol, en m^2 /jour.

Un autre modèle sinusoïdale était proposé par l'ASHRAE pour calculer la température du sous-sol :

$$T_s(z, t) = T_{s,average} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{a_s t_p}}} \cdot T_{amplitude,1} \cdot \sin \left[\frac{2\pi n}{t_p} (t - PL'_1) - z \sqrt{\frac{\pi n}{a_s t_p}} \right] \quad (4.7)$$

Avec : $PL'_1 = PL'_1 - \frac{t_p}{4}$

Xing (Xing, 2014) a introduit un facteur de correction sur l'équation (4.6) tout en tenant compte de la couverture du sol :

$$T_s(z, t) = T_{s,average} - \beta \sum_{n=1}^2 e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{a_s t_p}}} \cdot T_{amplitude,n} \cdot \cos \left[\frac{2\pi n}{t_p} (t - PL_n) - z \sqrt{\frac{\pi n}{a_s t_p}} \right] \quad (4.8)$$

Avec β : Facteur de correction (adimensionnel).

Des modèles plus simplifiées qui contient moins de variables sont présentées afin de minimiser les erreurs et rendre les calculs plus faciles comme le modèle Al-Ajmi (Al-Ajmi et al., 2006) qui est une fonction sinusoïdale du temps :

$$T(z,t) = T_m + A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{8760a}}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{8760} (t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{8760}{\pi a}}) \right] \quad (4.9)$$

A_s est l'amplitude annuelle de la température de surface (°C). t et t_0 sont respectivement l'heure de l'année (heures) et la constante de phase (heures).

Selon les auteurs, ce modèle produit des erreurs ne dépassant pas $\pm 1,1$ ° C lorsque les variables sont déterminées à partir de mesures sur le terrain.

Dans notre cas, la température du sol $T(z,t)$ en fonction de la période de l'année et de la profondeur a été calculée grâce à la formule proposée par Kusuda (Kusuda et al., 1983):

$$T(z,t) = T_m + A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365a}}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{365} (t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi a}}) \right] \quad (4.10)$$

Avec :

$T_{z,t}$: Température du sol à une profondeur Z et le jour t en °C.

T_m : Température annuelle moyenne du sol = température moyenne annuelle de l'air ambiant en °C.

A_s : Amplitude annuelle de la température de surface en °C.

t et t_0 sont respectivement l'heure de l'année (jours) et la constante de phase (jours).

a : Diffusivité thermique du sol (m^2 /jour).

Afin d'appliquer l'équation (4.10) pour le climat d'Ouargla, les données mesurées ont été obtenues à partir de la station météorologique située à l'aéroport de Ouargla (Latitude : 31°55'N, Longitude : 05°24'E et Altitude : 141 m) durant l'année 2020.

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

La ville d'Ouargla qui se situe au Sud-Est de l'Algérie (Fig.4.5) Son climat est classé comme un climat saharien aride, où la température moyenne pendant les mois les plus chauds dépasse 46 °C et l'humidité relative ne dépasse pas 30%.

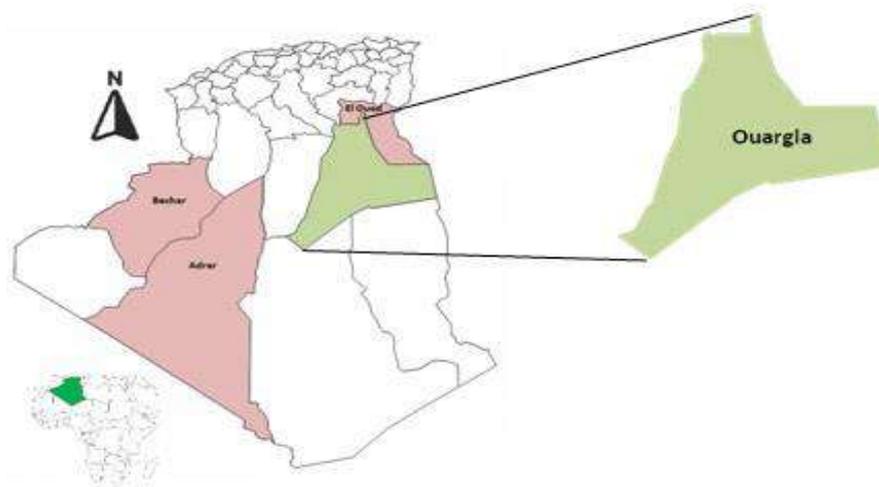


Fig.4.5. Position géographique de la zone d'étude

Le tableau 4.1 montre que la température moyenne du sol (T_m) et l'amplitude de la température du sol (A_s) sont respectivement de 26,25 °C et 12,20 °C. Les variations de la température moyenne journalière du sol sont présentées dans la Figure.4.6.

D'où il a pu être observé que ce paramètre montre des fluctuations tout au long de l'année avec la valeur la plus élevée en saison estivale et la valeur la plus basse (t_0) observée en janvier (jour 13).

Tableau.4.1. Températures mensuelles du sol pour la ville d'Ouargla durant l'année 2020

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
Température minimale du sol (°C)	1,71	2,56	6,35	11,69	17,15	24,76	27,21	28,42	22,64	15,59	6,82	3,64	14,05
Température maximale du sol (°C)	23,15	25,38	31,92	37,54	42,21	51,11	54,45	53,57	47,81	38,95	29,21	26,04	38,45
Température moyenne du sol (°C)	12,43	13,97	19,14	24,62	29,68	37,94	40,83	41,00	35,23	27,27	18,02	14,84	26,25
Amplitude mensuelle (°C)	10,72	11,41	12,78	12,92	12,53	13,18	13,62	12,57	12,59	11,68	11,19	11,20	12,20

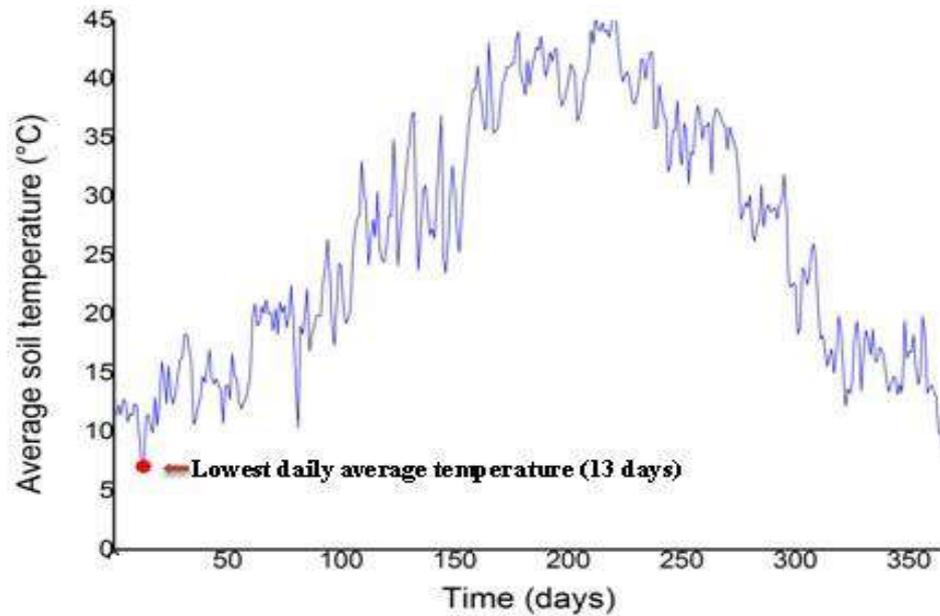


Fig.4.6. Température moyenne quotidienne du sol en 2020

En substituant les valeurs mentionnées ci-dessus dans l'équation (4.10), la température du sol à Ouargla peut s'écrire comme suit :

$$T(z,t) = 26.25 + 12.20 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{365} \left(t - 13 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (4.11)$$

Les températures du sol à différentes profondeurs ont été générées partir d'un programme de calcul sous MATLAB. Dans cette simulation, les trois types de sols les plus rencontrés à Ouargla ont été considérés comme des sols argileux, des sols Limons argilo-sableux et des sols sableux (tableau 4.2) :

Tableau.4.2. Nature des sols et propriétés physiques (Benhammou & Draoui, 2011)

Nature du sol	Masse volumique (ρ) (kg/m ³)	Diffusivité thermique (α) (m ² /s) $\times 10^{-7}$	Capacité calorifique (C_p) (J/kg °C)
Argile	1500	9,69	880
Limon argilo – sableux	1800	6,22	1340
Sable	1780	3,76	1390

4.4. Mesure expérimentale du profil de la température du sol

Le profil de la température verticale du sol à différentes profondeurs est l'un des principaux moyens de quantifier et d'exploiter les techniques de chauffage ou de refroidissement par le sol pour le conditionnement des bâtiments.

La figure 4.7 représente la variation mensuelle de la température moyenne extérieure sous abris de la ville d'Ouargla entre juin et août 2020, où la température atteint et dépasse parfois 46 °C et l'humidité relative ne dépasse pas 30%. L'inconfort thermique est largement ressenti par les occupants de la région.

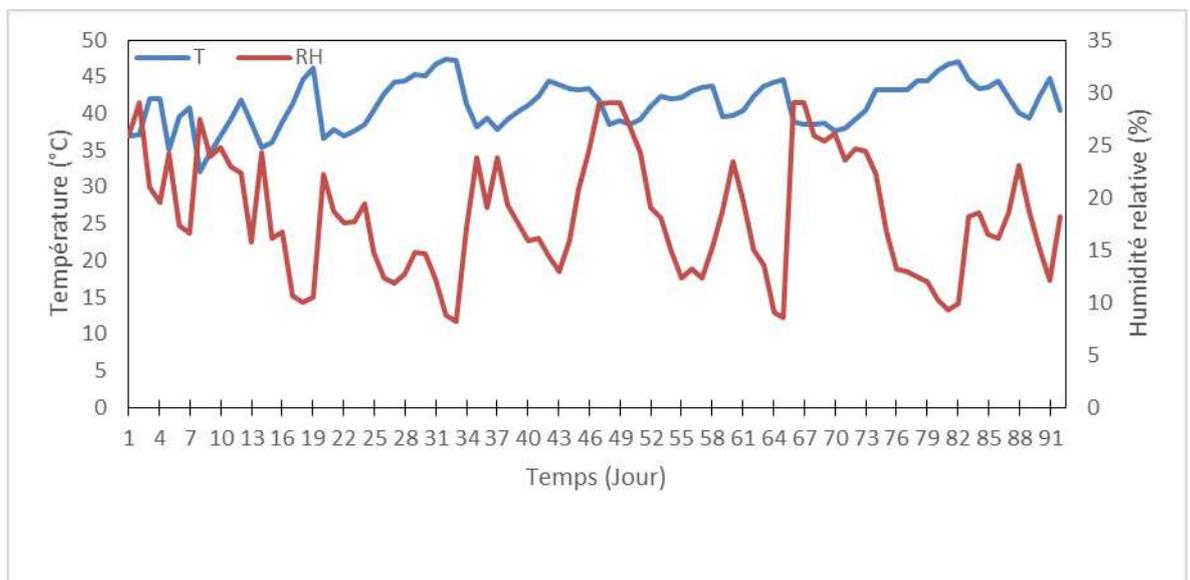


Fig.4.7. Variation de la température et de l'humidité relative dans la ville d'Ouargla (juin, juillet et août 2020)

4.4.1. Description du dispositif expérimental

Les mesures In-Situ ont été menées sur un site à Ouargla (Hai Enasr, Latitude =31,945402, Longitude=5,264964, et Altitude=142 m) (Fig.4.8).

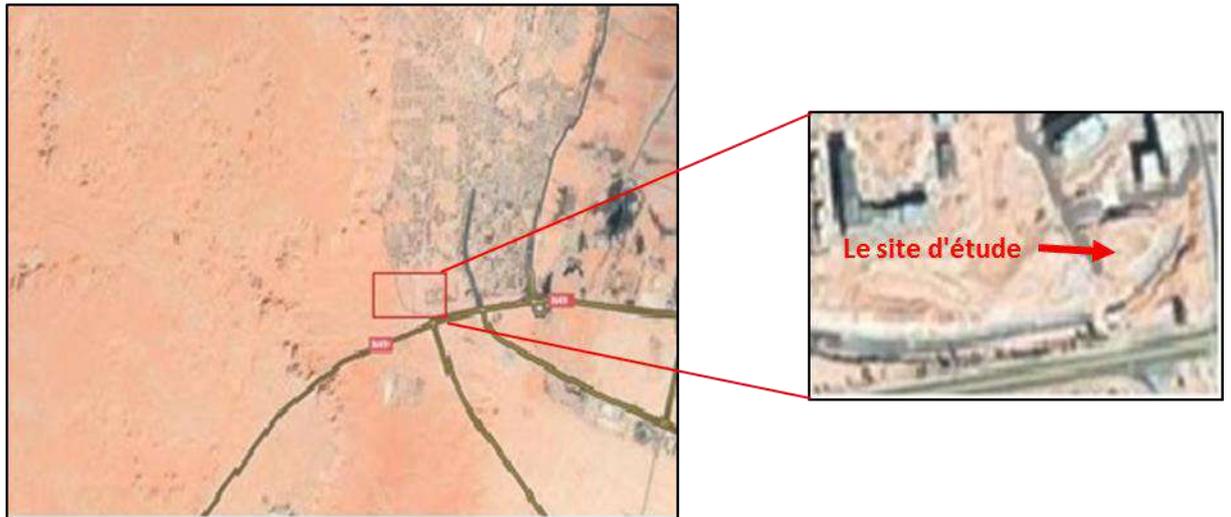


Fig.4.8. Lieu d'implantation du site de l'étude sur Google Maps

Les capteurs de température Thermocouples type K ont été utilisés dans cette étude. Ces capteurs étaient les mieux adaptés pour faire une telle mesure. Quatre tubes en PVC verticaux parallèles de 40 mm de diamètre et à une distance de 20 cm entre eux ont été installés à des profondeurs de 0.5, 1, 1.5 et 2 mètres à la surface du sol (Fig.4.9).



Fig.4.9. Préparation et installation du dispositif expérimental

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

Les capteurs de température ont été installés à l'intérieur des tubes PVC enterrés pour éliminer l'effet des rayons solaires (Fig.4.10). Les mesures sont prises toutes les minutes de 06 heures à 18 heures. Toutes les données acquises par les capteurs ont été transférées et sauvegardées sur une Data Logger

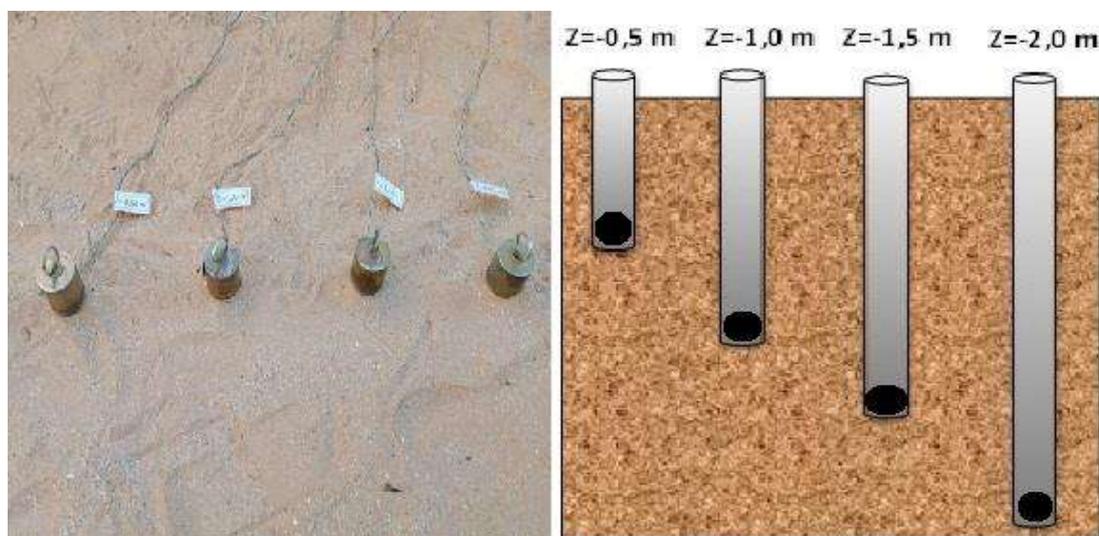


Fig.4.10. Implantation de thermocouples aux différentes profondeurs (0,5, 1, 1,5 et 2 mètres)

4.4.2. Résultats et discussion

4.4.2.1. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs

Les figures 4.11, 4.12 et 4.13 illustrent le comportement thermique du sol à différentes profondeurs : 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 et 5 mètres pour les trois types de sol ($\alpha=0,0578$, $\alpha =0,0537$ et $\alpha =0,0325$ m² /jour) est calculée par de l'équation (4.11) à l'aide du logiciel MATLAB. Les mêmes graphiques sinusoïdaux ont été obtenus tout au long du graphique temps-température. Cependant, leur diffusivité thermique est différente. Cela est dû au fait que la chaleur se déplace rapidement à travers le sol lorsque la diffusivité thermique est plus élevée. Par conséquent, la variation de température plus élevée du sol a été obtenue pour une diffusivité thermique plus élevée. À partir d'une profondeur de 2 mètres sous la surface du sol, la température du sol simulé de la région d'Ouargla pendant les mois les plus chauds ne dépasse pas 30°C pour les trois types de sol, tandis que la température ambiante de l'air atteint les 46 °C. À partir d'une profondeur de 5 mètres, la température du sol n'a pas la forme d'une sinusoïde et elle devient relativement constante vers 27 °C. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par des chercheurs précédents (Benhammou et al., 2015; Nasreddine et al., 2019).

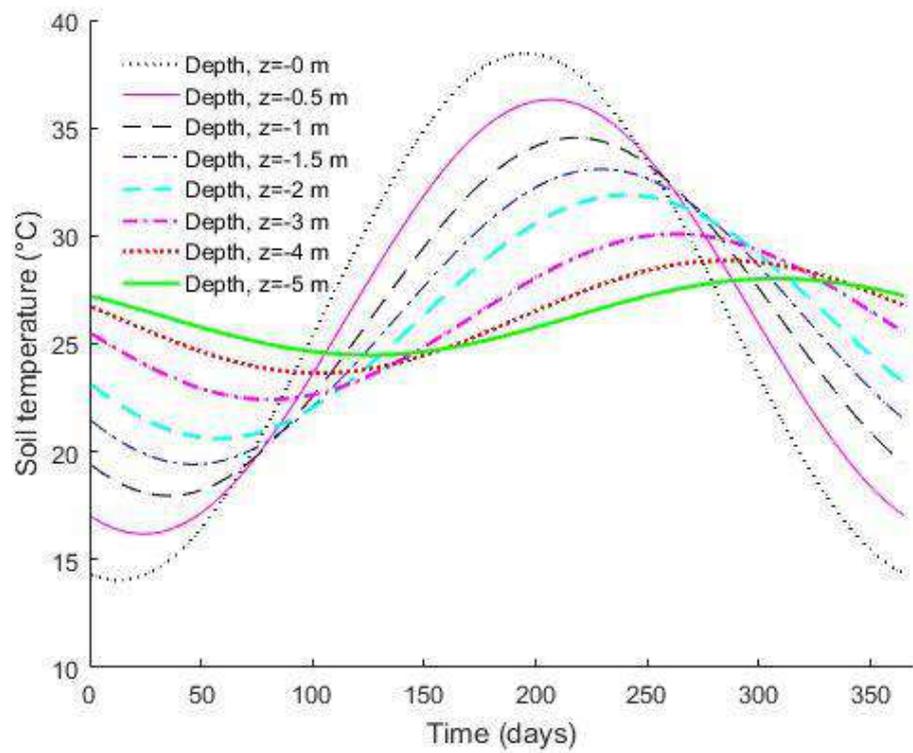


Fig.4.11. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol argileux

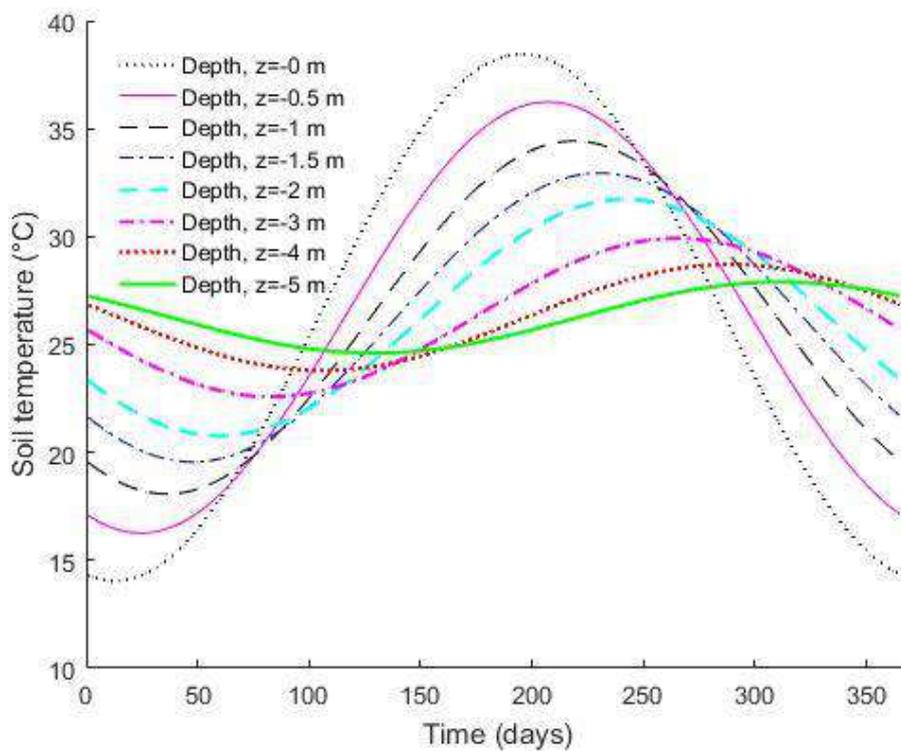


Fig.4.12. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol limono-argileux

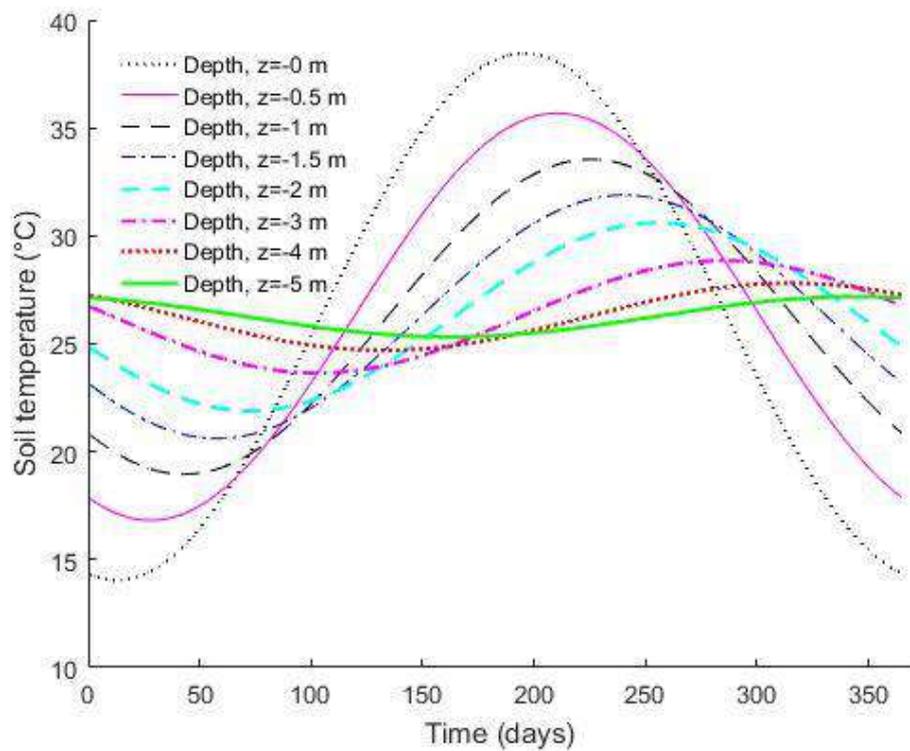


Fig.4.13. Comportement thermique du sol à différentes profondeurs pour le sol sableux

4.4.2.2. Profil des températures tri-horaires dans le sol

La figure 4.14 illustre les températures dans le sol à cinq profondeurs : $Z=0$, $Z=-0.5$, $Z=-1$, $Z=-1.5$ et $Z=-2$ m à l'intérieur des tubes PVC, mesurées à 06, 09, 12, 15 et 18 heures pendant quatre jours différents : le 08 août 2020, le 11 août 2020, 15 août 2020 et 17 août 2020.

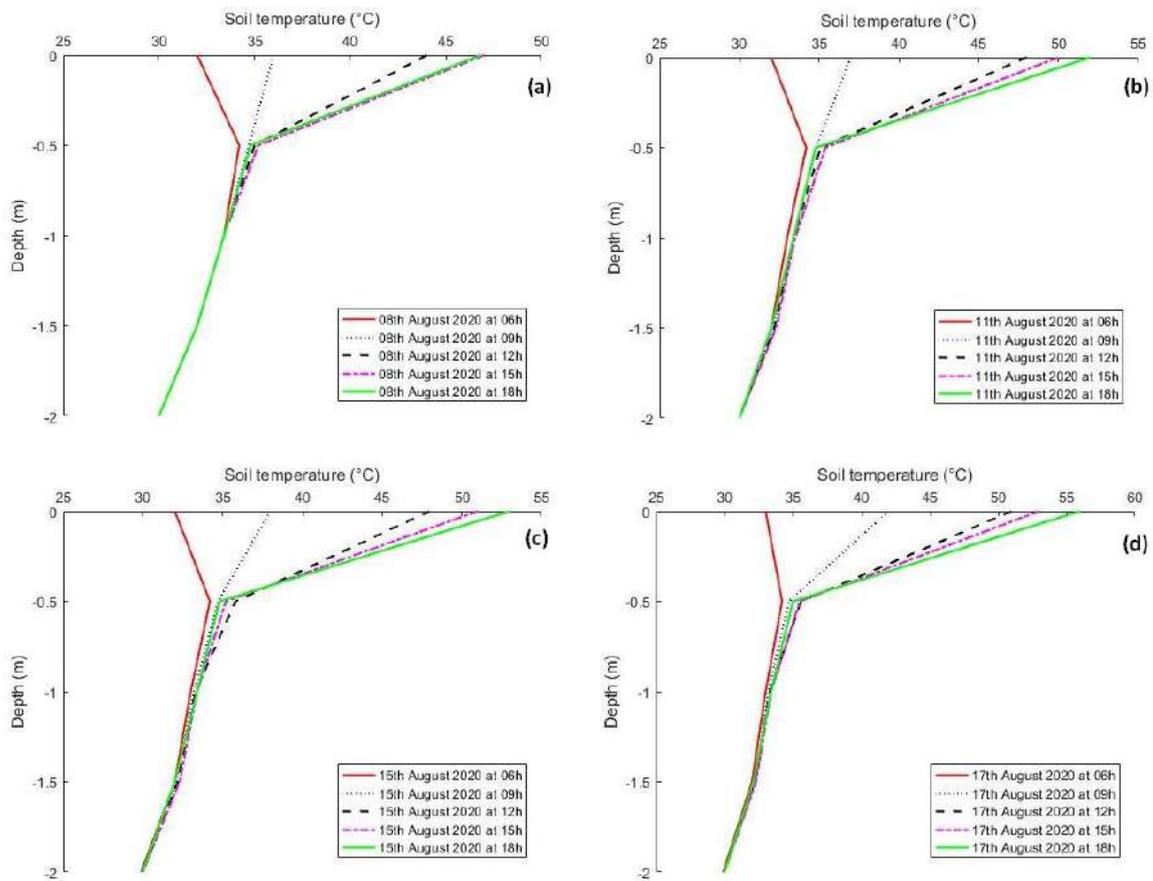


Fig.4.14. Températures dans le sol mesurées : (a) 08 août 2020, (b) 11 août 2020, (c) 15 août 2020, et (d) 17 août 2020

On remarque qu'à 06 heures du matin la température du sol atteint sa valeur la plus basse d'environ 31 °C à 33 °C puis augmente à environ 34 °C et 36 °C à 1 m et 0,5 m respectivement à midi. Après 17 heures, elle commence à diminuer en raison de la réduction de l'intensité du rayonnement solaire. On peut également remarquer qu'à une profondeur d'environ 2 m de la surface du sol, la température avait une valeur constante d'environ 30 °C pendant toute la journée.

La température de l'air ambiant et le rayonnement solaire global mesurés pour les quatre jours de l'étude sont illustrés à la figure 4.15.

La température de l'air ambiant mesurée le 17 août 2020 était significativement plus élevée que celle des 08, 11 et 15 août 2020. La température de l'air ambiant la plus élevée était d'environ 44,4 °C le 17 et d'environ 43,2 °C, 39,2 °C et 38,8 °C les 15, 11 et 08 août 2020 respectivement.

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

L'intensité de rayonnement solaire global la plus élevée était d'environ 916 W/m^2 le 11 août et elle était d'environ 887 W/m^2 , 883 W/m^2 et 881 W/m^2 le 08, 15 et 17 août respectivement.

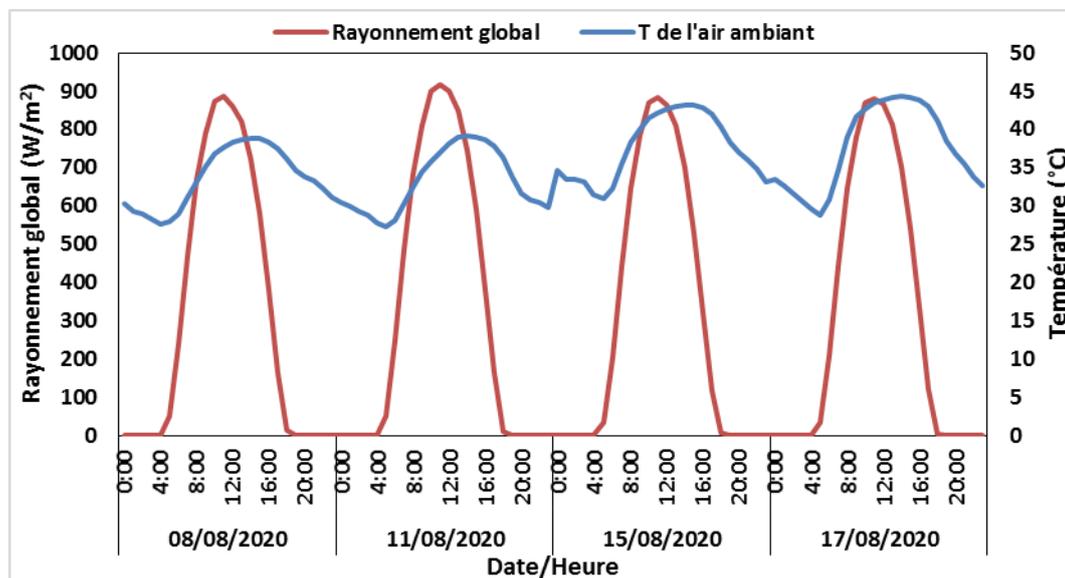


Fig.4.15. La température de l'air ambiant et du rayonnement solaire global le 08 août 2020, 11 août 2020, 15 août 2020 et 17 août 2020.

4.4.2.3. Validation expérimentale et confrontation des températures du sol

Les températures du sol calculées et mesurées aux heures sélectionnées 06h, 09h, 12h, 15h et 18h le 08 août 2020 sont représentées dans la Figure 4.16. Les résultats montrent une concordance entre la température dans le sol calculée et mesurée d'environ $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ notamment à partir de 1.5 m de profondeur où la température est presque constante. Cependant, la différence maximale entre les températures du sol calculées et mesurées était inférieure à $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui a été trouvé près de la surface du sol ($Z=0 \text{ m}$) pour une diffusivité thermique $=0,0325 \text{ m}^2/\text{jour}$. Cela pourrait être le résultat de l'utilisation de propriétés thermophysiques du sol constantes et uniformes dans la formule de Kusuda, alors que les propriétés thermophysiques du sol pourraient ne pas être uniformes, particulièrement près de la surface (Wu et al., 2010).

Une bonne concordance entre les calculs et les mesures est très bonne notamment à partir de 2 m de profondeur où la température est presque constante et égale à $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 4 : Profil thermique du sol : Etude numérique et expérimentale

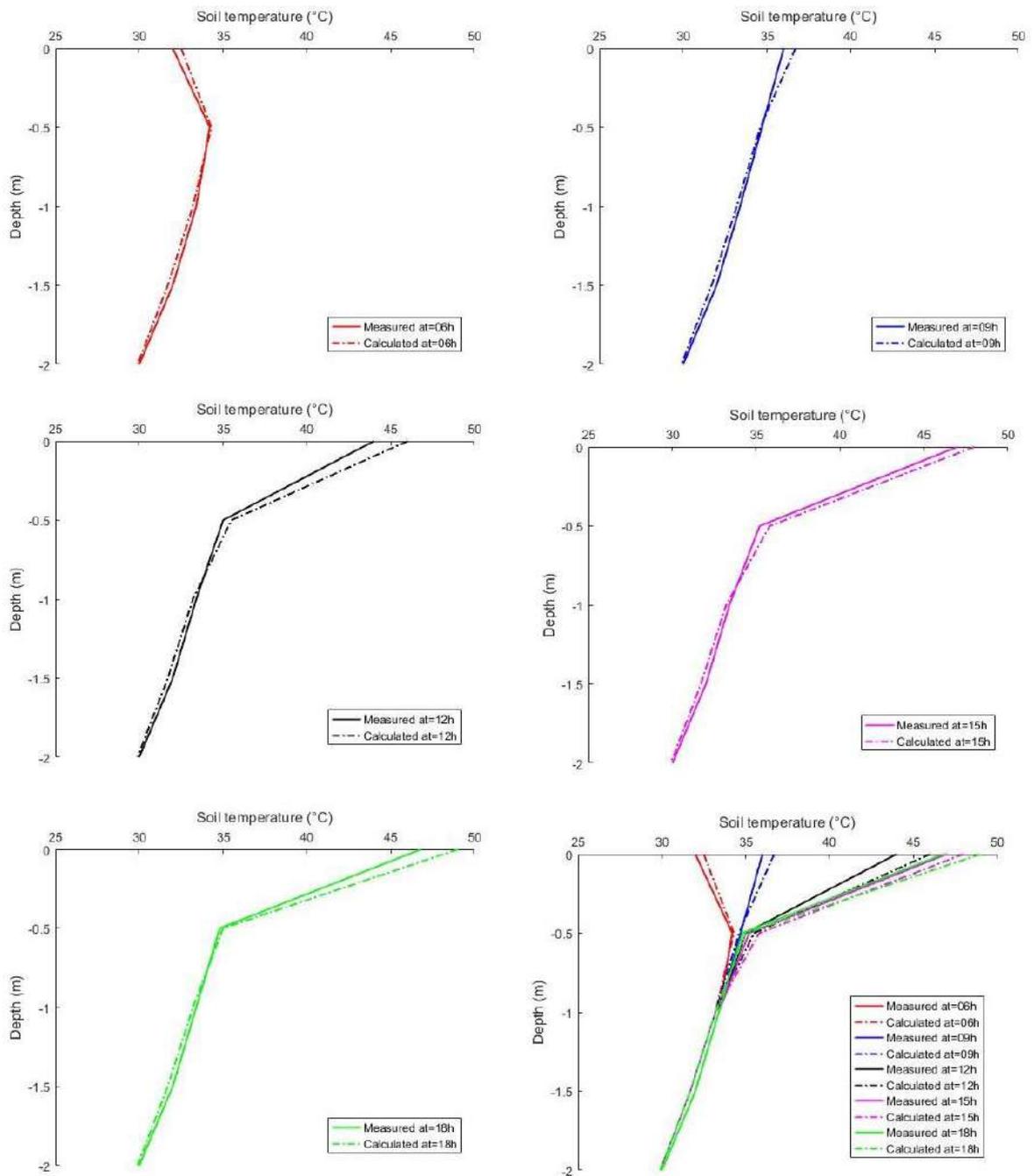


Fig.4.16. Températures dans le sol mesurées et calculées durant la journée du 08 août 2020

4.5. Conclusion

L'énergie géothermique est l'une des plus importantes énergies renouvelables largement utilisées dans le monde, en raison de sa grande fiabilité. Dans ce chapitre une étude expérimentale, des mesures in-situ du profil vertical de la température du sol sur un site dans la région d'Ouargla en mois d'août 2020 ont été menés.

Le profil vertical de la température du sol est mesuré à partir de la surface de la terre ($Z=0$) jusqu'à 2 m de profondeur avec un pas de temps d'une minute. Nous avons constaté que la température au niveau $Z=-2$ m est inchangeable et elle avait une valeur constante d'environ 30 °C pendant toute la journée. Ensuite les températures mesurées ont été confrontées avec celles générées à partir de l'équation de Kusuda à l'aide du logiciel MATLAB.

Les résultats obtenus servent comme base de données aux chercheurs et concepteurs désirent d'étudier le potentiel d'utilisation du sol en tant que dissipateur ou source de chaleur pour de multiples activités.

Sur la base de ces résultats, nous avons opté dans le prochain chapitre d'étudier les potentiels d'offrir le confort thermique dans la construction souterraine dans les régions chaudes en général et la ville d'Ouargla en particulier.

CHAPITRE 5

**Refroidissement par la
géothermie:
Mesure expérimentale et
simulation**

5.1. Introduction

La simulation thermique des bâtiments est l'analyse dynamique de la performance énergétique des bâtiments à l'aide de techniques de modélisation et de simulation informatiques. La simulation thermique dynamique (STD) a pour objectif de créer un modèle numérique permettant de simuler le comportement du bâtiment heure par heure en fonction de ses caractéristiques (orientation, isolation, inertie, surfaces vitrées, ...).

Les outils de simulation thermique sont de plus en plus utilisés par tous les métiers impliqués dans la conception des bâtiments. Au fur et à mesure que les logiciels d'analyse de bâtiment deviennent plus sophistiqués, intégrés et plus faciles à utiliser, les chercheurs, les designers et les architectes sont confrontés à l'opportunité et à la nécessité de mieux comprendre la performance du bâtiment, notamment en termes d'optimisation énergétique (Guyot, 2020).

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les performances thermiques d'une salle souterraine située à Ouargla, et d'analyser si cette dernière offre un environnement confortable aux occupants. La température de l'air et l'humidité relative, qui sont des paramètres importants dans le confort thermique, ont été prises en compte pour cette mesure. Une simulation utilisant les logiciels Google SketchUp et TRNSYS a été utilisée pour analyser les deux paramètres environnementaux que nous mesurons.

Les données prélevées à l'intérieur de la salle souterraine ont été ensuite confrontées avec les résultats de la modélisation et la simulation de ladite salle.

Enfin Tous les résultats que nous obtenons ont été comparés au confort de l'ASHRAE Standard 55-2020.

5.2. Présentation de la région d'Ouargla

5.2.1. Situation géographique

La région d'Ouargla est considérée comme l'une des plus grandes oasis du Sahara Algérien (Fig.5.1). Elle est située au Sud Est de l'Algérie, couvrant une superficie de 163230 Km². Elle est limitée :

- au Nord par les wilayas de Djelfa, El Oued et Biskra ;
- à l'Est par la Tunisie ;
- à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa ;
- au Sud par les wilayas de Tamanrasset et Illizi

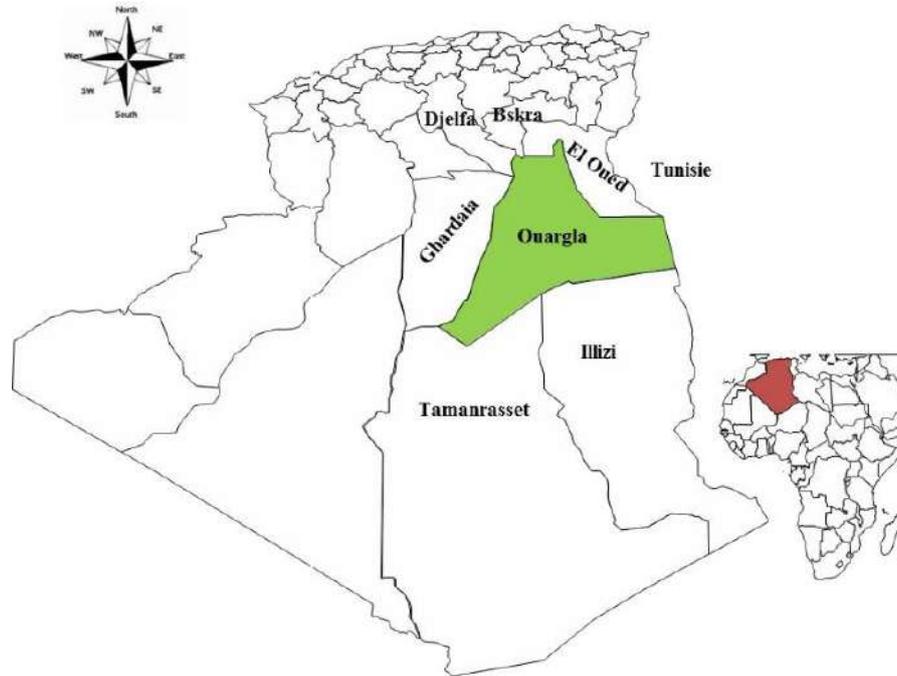


Fig.5.1. Situation géographique d’Ouargla

5.2.2. Synthèse climatique

La région d’Ouargla est caractérisée par un climat désertique chaud (Classification de Köppen BWh) typique du Sahara avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et très doux. Elle est marquée aussi par une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l’écosystème.

Les variations diurnes sont assez élevées, elles sont évidemment beaucoup plus fortes lorsque l’on considère non plus la température de l’air, mais celle du sol.

5.2.2.1. Températures

En été, la chaleur est extrême et prend un caractère persistant : les températures moyennes maximales dépassent 46 °C en juillet (le mois le plus chaud) mais tournent plutôt autour de 50 °C entre juin et septembre. Les températures sont agréables et modérément élevées en hiver, mais seulement la journée, car dans les étendues désertiques, il n’y a rien pour retenir la chaleur et températures minimales moyennes avoisinent 5 °C (Fig.5.2).

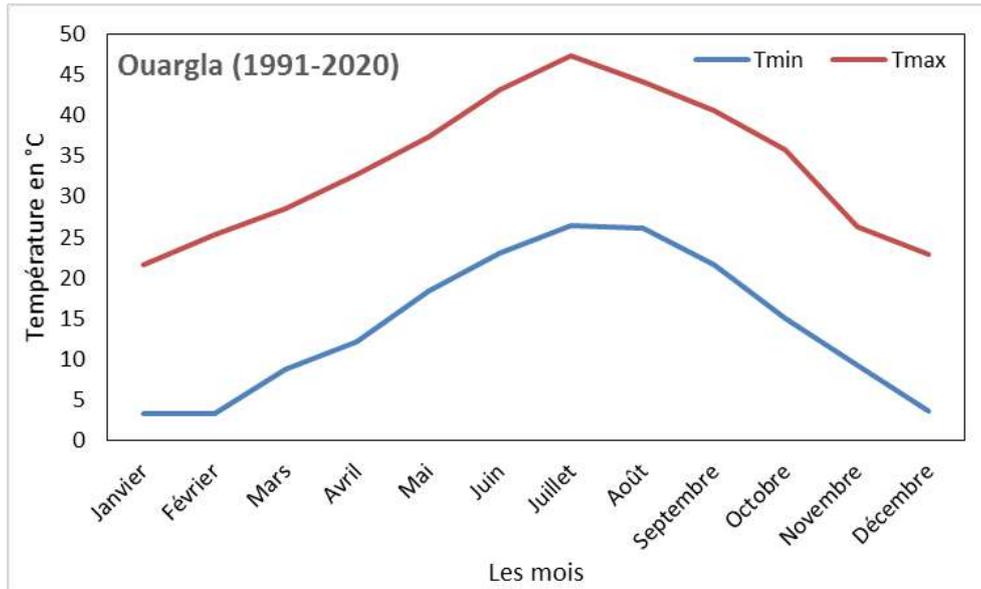


Fig.5.2. Température mensuelle minimale et maximale à Ouargla (1991-2020)

5.2.2.2. Humidité relative

Il est à noter un faible taux de l'humidité de l'air même à l'ombre qui peut descendre jusqu'à 10 % en juillet. Ce phénomène est dû aux fortes évaporations, aux hautes températures combinées à l'action des vents chauds notamment du Sirocco. Par contre, en hiver, elle dépasse 70 % en décembre et en janvier (Fig.5.3)

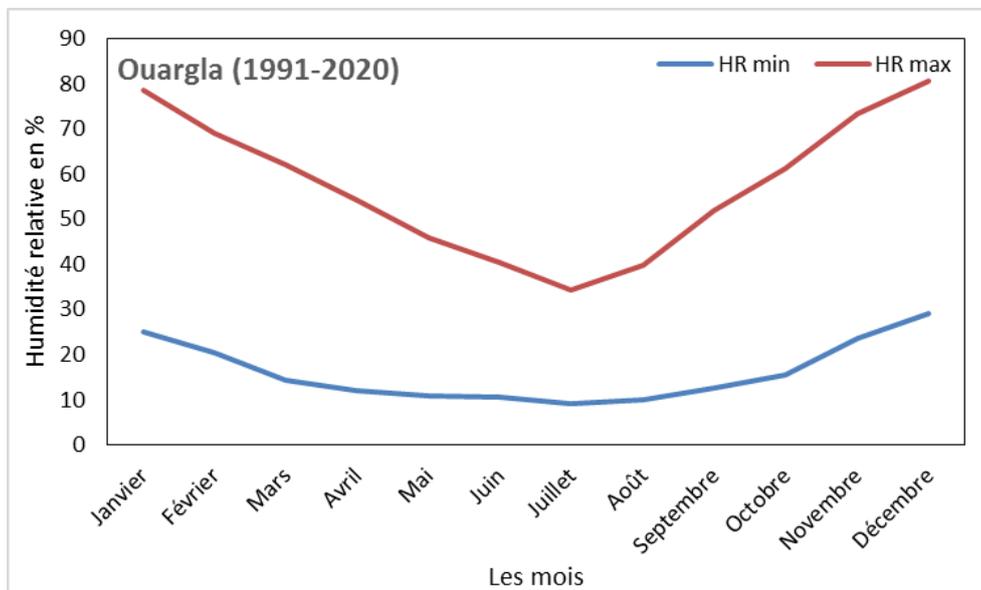


Fig.5.3. Humidité relative mensuelle minimale et maximale à Ouargla (1991-2020)

5.2.2.3. Rayonnement solaire

On a constaté d'après la figure.5.4 que la région d'Ouargla dispose d'un gisement solaire important. L'énergie acquise quotidiennement peut dépasser 7 kWh/m² dans la période estivale et annuellement elle est de l'ordre de 2500 kWh/m².

Avec une durée d'insolation dépassant les 3500 heures annuellement, la région d'Ouargla dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire et cela peut encourager l'exploitation de cette énergie surtout dans les régions isolées de la ville qui ne sont pas atteints par le réseau électrique ou celle où la charge est très grande ce qui provoque les coupures d'électricité.

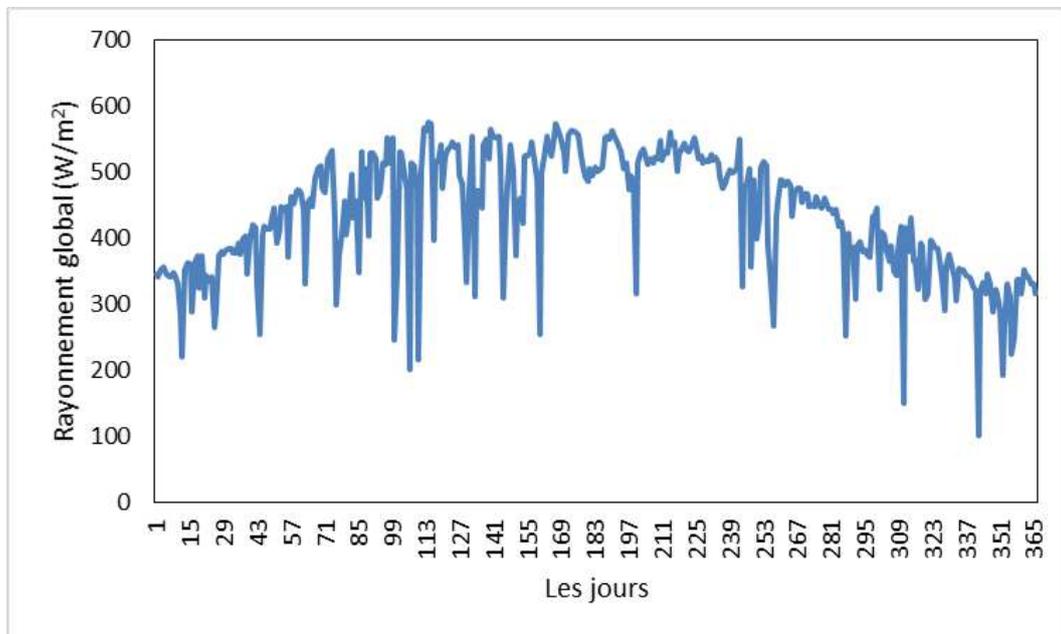


Fig.5.4. Rayonnement solaire globale à Ouargla durant l'année 2020

5.2.2.4. Vents

Les vents sont très fréquents et peuvent souffler de mars au juin, provoquant ainsi le soulèvement de sable. Les vents dominants sont ceux de Est à Nord Est (Fig.5.5) avec des vitesses pouvant atteindre 7 m/s et parfois dépassent les 25 m/s (90 km/h). Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé au cours de l'année.

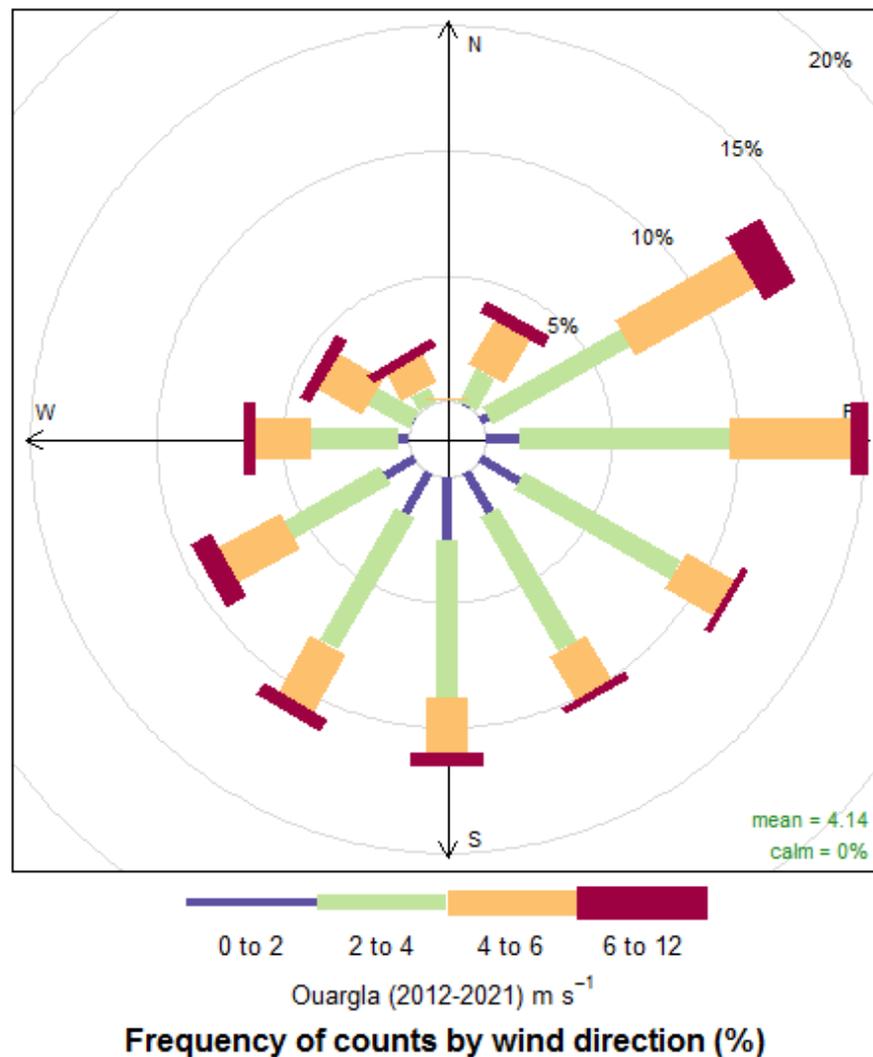


Fig.5.5. Vents dominants enregistrés à Ouargla sur la période (1991-2020)

5.2.2.5. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèches et humides de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec $P=2T$ (Naima et al., 2021).

La figure 5.6 porte le Diagramme Ombrothermique de la région d'Ouargla établi à partir des données pluviométriques et thermiques moyennes mensuelles calculées sur une période de 30 ans (1991-2020). Elle montre que la saison sèche à Ouargla s'étend presque sur toute l'année.

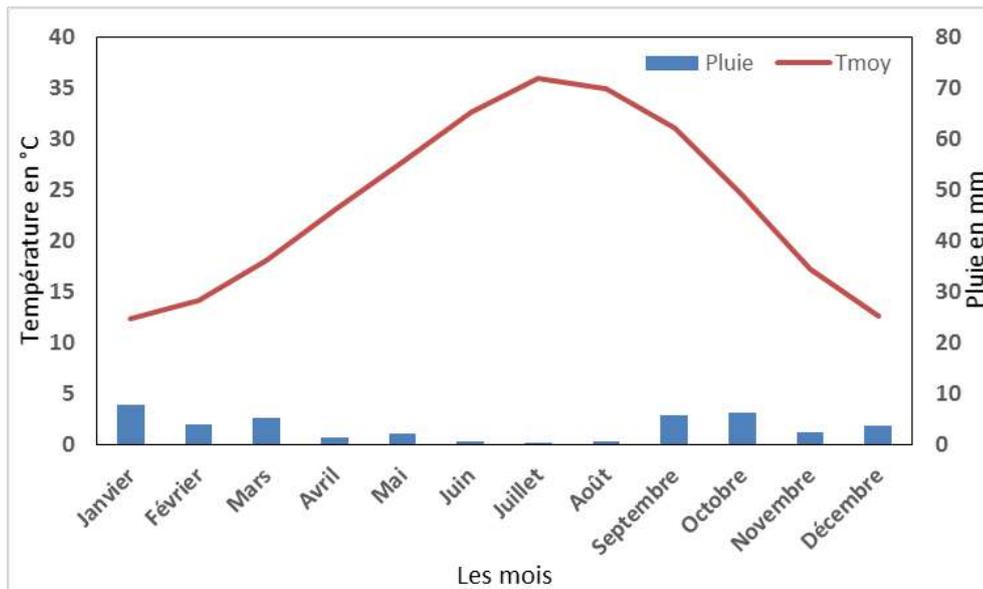


Fig.5.6. Diagramme Ombrothermique d'Ouargla (1991-2020)

5.3. Descriptif de l'expérimentation

5.3.1. Descriptif de l'habitat étudié

L'étude de cas comprend une maison souterraine d'une famille de cinq personnes (2 adultes et 3 enfants) à Ouargla qui n'a qu'un seul étage au-dessus du sol. Le sous-sol est situé à une profondeur de 2,34 m et à 0,4 m au-dessus de la surface du sol (soit une hauteur de toiture de 2,74 m). Les mesures ont été effectuées dans la salle souterraine d'une superficie de 21,41 m². Les autres dimensions sont représentées en détail dans sur la figure 5.7.

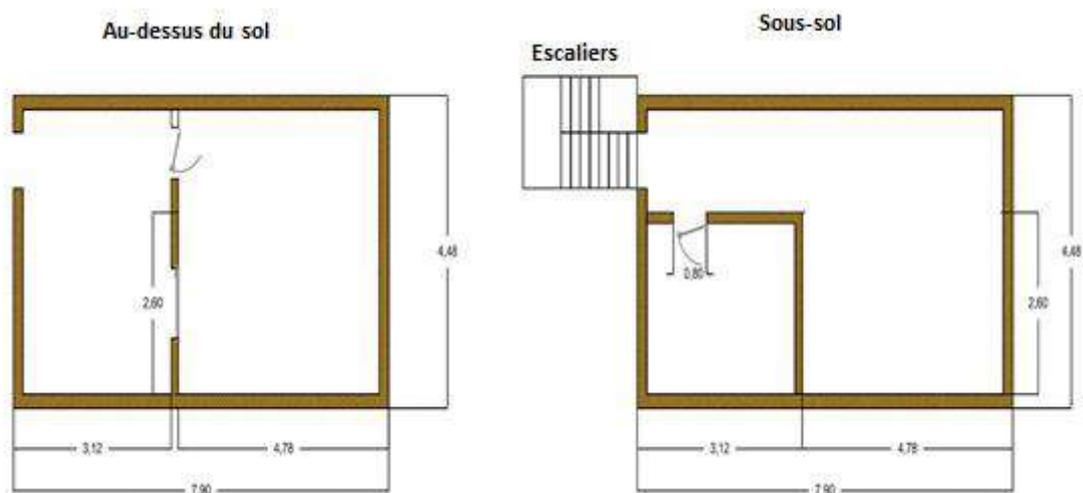


Fig.5.7. Plan descriptif de la salle étudiée

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

La pièce a plusieurs composants qui sont l'entrée, les escaliers, le couloir et le salon, comme le montre la Figure.5.8. La maison a été occupée pendant toutes les opérations de surveillance par les membres de la famille y compris la salle étudiée. Il contenait un éclairage fluorescent, un ventilateur de plafond, un congélateur et une télévision fonctionnant presque toute la journée. Les murs hors sol et la séparation entre le salon et la chambre étaient en brique creuse avec du mortier de ciment des deux côtés. Le mur nord souterrain (mur de façade) était constitué de 20 cm de béton, les autres murs étaient constitués de blocs de béton avec du mortier de ciment sur la surface intérieure. Les sols étaient constitués de couches de béton et de mortier recouvertes de carrelage. Les toits étaient composés d'une dalle de béton avec du mortier de plâtre sur la face inférieure.



Fig.5.8. Vue réelle de la salle souterraine étudiée : (A) Entrée, (B) Escaliers, (C) Couloir et (D) Milieu de la salle

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

5.3.2. Matériaux de construction

Il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-physiques de chacun des matériaux utilisés parce qu'ils jouent un rôle majeur sur les calculs de transfert de chaleur. Ces propriétés thermo-physiques sont caractérisées par l'épaisseur du matériel, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique. Les matériaux qui constituent les murs internes et externes, la toiture et le plancher ainsi que leurs propriétés thermo-physiques respectives sont donnés par le tableau.5.1.

Tableau.5.1. Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction (DTRC3-2, 1997)

Matériel	λ (W/m °C)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg °C)	Epaisseur (cm)
Dalle en béton	1,45	1450	1080	20
Béton	1,75	2500	1080	10
Bloc de béton	0,44	1300	1080	20
Brique creuse	0,48	900	936	15
Ciment	1,4	2200	1080	1,5
Plâtre	0,35	900	936	1,5
Carrelage	2,1	2200	936	2,0

5.3.3. Instruments de mesure

Pour pouvoir faire une étude sur le confort thermique, nous avons besoin de différentes données telles que la température intérieure et extérieure, l'humidité relative intérieure et extérieure, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Ces données peuvent être obtenues soit par expérimentation, soit à partir d'un logiciel de simulations que nous utilisons ultérieurement.

Tous les détails des paramètres mesurés et des instruments sont présentés dans le tableau 5.2. Pour les capteurs de mesure de température et de l'humidité relative dans la salle de l'expérience, on a utilisé deux types de capteurs :

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

- Des capteurs numériques MAX6675 (Fig.5.9f) avec thermocouples de type K (Fig.5.9a) pour mesurer les températures.
- Des capteurs numériques DMT11 (Fig.5.9b) qui servent à la fois pour mesurer l'humidité relative et la température de l'air.

Pour mesurer le rayonnement solaire global et la vitesse et la direction du vent à l'extérieur, nous avons utilisés un Pyranomètre (Fig.5.9d) et un Windsonic (Fig.5.9e) respectivement.

Tous les capteurs ont été connectés via Arduino MEGA (Fig.5.9c) à un ordinateur portable par câble USB.

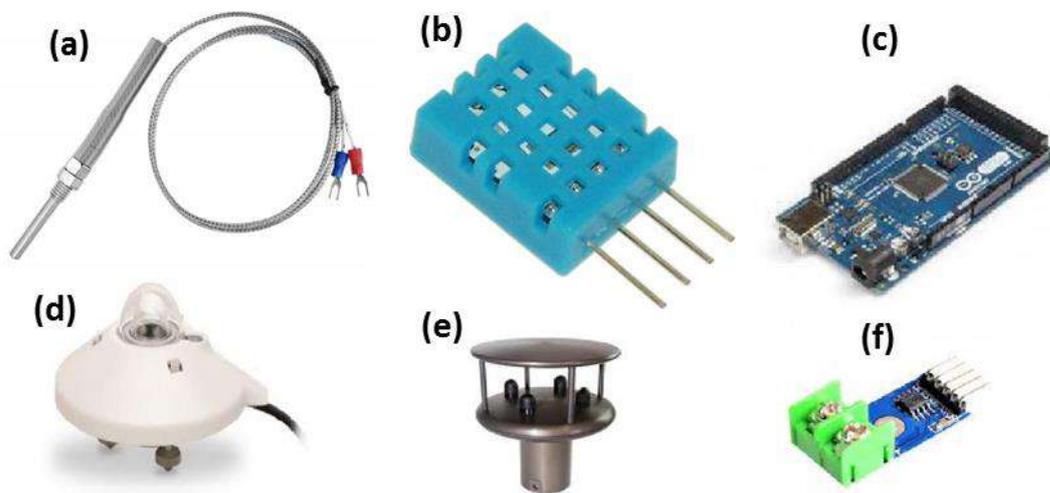


Fig.5.9. Capteurs et appareils de mesure utilisés dans l'étude expérimentale

Toutes les données acquises par les capteurs ont été transférées et sauvegardées sur une Data Logger (Fig.5.10).



Fig.5.10. Montage de l'acquisition des données à l'intérieur de la salle souterraine

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Les enregistreurs de données ont été programmés à demander aux instruments connectés de lire, de rapporter et de sauvegarder les données mesurées dans l'ordinateur à 1 minute d'intervalle.

Tableau.5.2. Caractéristiques des paramètres météorologiques mesurées et instruments correspondants

Paramètre	Unité	Instrument	Pas de temps	Précision du capteur
Température	°C	Thermocouple Type K	1 min	±1.5°C
Humidité relative	%	Module DMT11	1 min	±5%
Rayonnement global	W/m ²	Pyranomètre	1 min	±2%
Vitesse du vent	m/s	Windsonic	1 min	1.2 m/s
Direction du vent	°	Windsonic	1 min	±2°

5.4. Choix des outils de la simulation

La simulation est une série de calculs effectués par un ordinateur et reproduisant des phénomènes physiques pour s'approcher de la réalité ; elle offre la possibilité de comparer de nombreuses variables entre elles en économisant du temps et des moyens. Elle permet ainsi d'atteindre plus facilement un objectif donné.

Le choix de l'outil de simulation dépendra des objectifs fixés par l'utilisateur, ainsi que du niveau de précision recherché. En effet, plusieurs auteurs ont réalisé des comparaisons entre différents logiciels de simulation thermique dynamique (TRNSYS, EnergyPlus, Codyba, Solene et Comfie Pléiade) et ont souvent confirmé la performance de TRNSYS (Asim et al., 2016; Khabbaz et al., 2016; Sobhy, 2017).

Dans les travaux de cette thèse, nous choisissons TRNSYS qui est un logiciel de simulation thermique dynamique très performant. C'est un outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la prédiction du comportement dynamique des bâtiments et des systèmes. L'atout principal de TRNSYS est sa modularité et son extensibilité : il est très facile d'y ajouter de nouveaux composants, des systèmes et des concepts énergétiques. Il est aussi possible de le coupler avec d'autres logiciels (CONTAM, COMIS, FLUENT...). Sa bibliothèque contient 50 familles de composants permettant de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multizonal), les systèmes de chauffage et de climatisation.

Le choix de l'outil de modélisation est porté sur le logiciel Google SketchUp qui nous permettra à l'aide d'un plug-in TRNSYS3D associé à ce dernier, de concevoir

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

l'architecture en trois dimensions et l'exporter vers TRNSYS qui avec ces diverses applications procédera à une simulation du concept proposé.

5.4.1. Google SketchUp

SketchUp est un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie conçu pour les architectes. Initialement édité par la société @Last Software (racheté ensuite par Google), ce logiciel se caractérise par des outils simples (rotation, extrusion, déplacement, etc.), qui en font un logiciel de 3D très différent des modeleurs 3D classiques. Il a été racheté en 2012 par la société Trimble.

Le bâtiment peut-être modélisé par Google SketchUp, un logiciel de dessin gratuit capable de créer des modèles en trois dimensions. Grâce au plug-in TRNSYS3D, il est possible d'exporter des fichiers créés sous Google SketchUp dans TRNSYS 18 plus aussi d'importer des fichiers créés sous TRNSYS 18 afin de visualiser sous Google SketchUp. On peut aussi observer les différentes pièces sous différents angles. En résumé, Google SketchUp propose une visualisation du bâtiment et les différents ombrages.

La figure.5.11 présente l'interface graphique de Google Sketch Up (Création d'un modèle 3D).

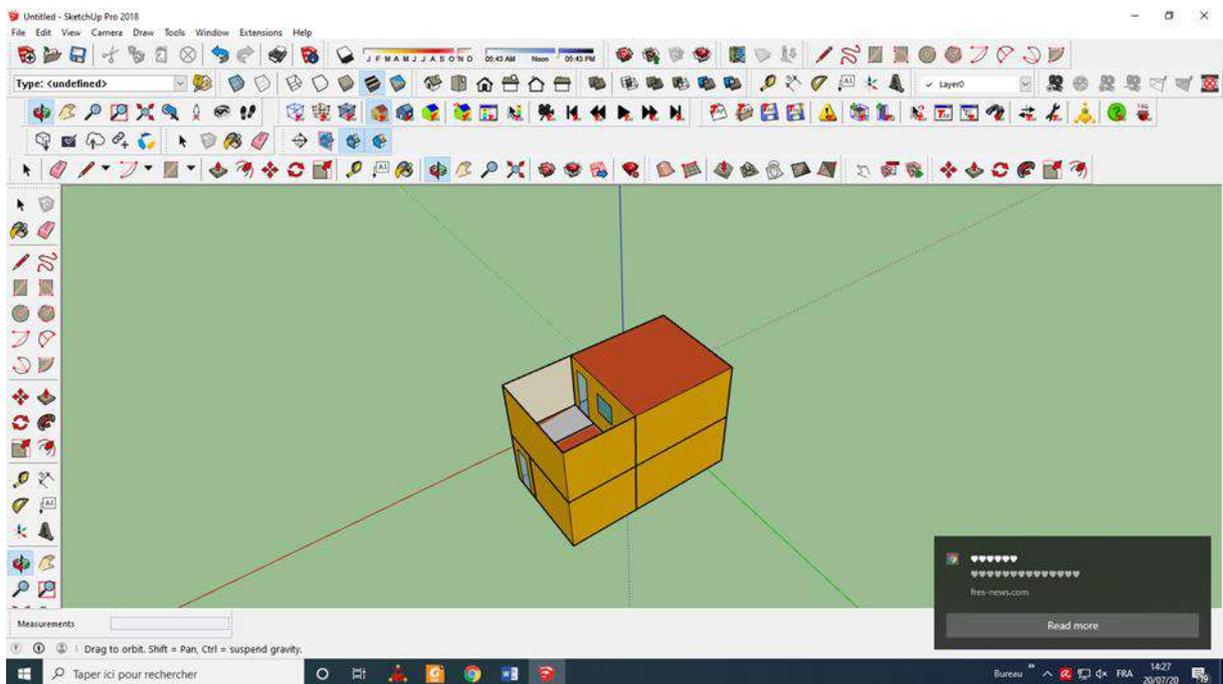


Fig.5.11. Interface graphique de Google Sketch Up (Création d'un modèle 3D)

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Google SketchUp est un logiciel qui présente de nombreux avantages notamment au niveau de la facilité d'utilisation de son interface de présentation ainsi que les multiples opportunités offertes pour la présentation du modèle. Sa versatilité en fait aujourd'hui un outil utilisé par de nombreux champs d'étude, il est possible de modifier l'affichage des différents volumes présents dans le monde 3D. Ainsi, il est possible de décider de rendre opaques ou semi-transparents les volumes thermiques dessinés, mais également de rendre opaques, semi-transparents ou mêmes invisibles les éléments d'environnement importés. L'ensemble de ces options est accessible dans le menu, en cochant les différentes options possibles.

5.4.2. TRNSYS

TRNSYS (TRAnSient SYstems Simulation) est un logiciel de simulation dynamique développé depuis 1975 par « Solar Energy Laboratory » de l'université de Wisconsin Madison. Il permet de calculer les performances énergétiques des bâtiments mono ou multizones en régime dynamique. Ce logiciel est basé sur une approche par schéma bloc permettant de décomposer des problèmes complexes en plusieurs problèmes simples dans un environnement ouvert afin de rajouter de nouveaux composants et concepts (SCL, 2018).

La modélisation des systèmes complexes dans l'environnement TRNSYS est généralement configurée par l'établissement de schémas fonctionnels en connectant des composants graphiques dans l'interface Studio où le système global est décomposé en sous-systèmes interconnectés (Fig.5.12).

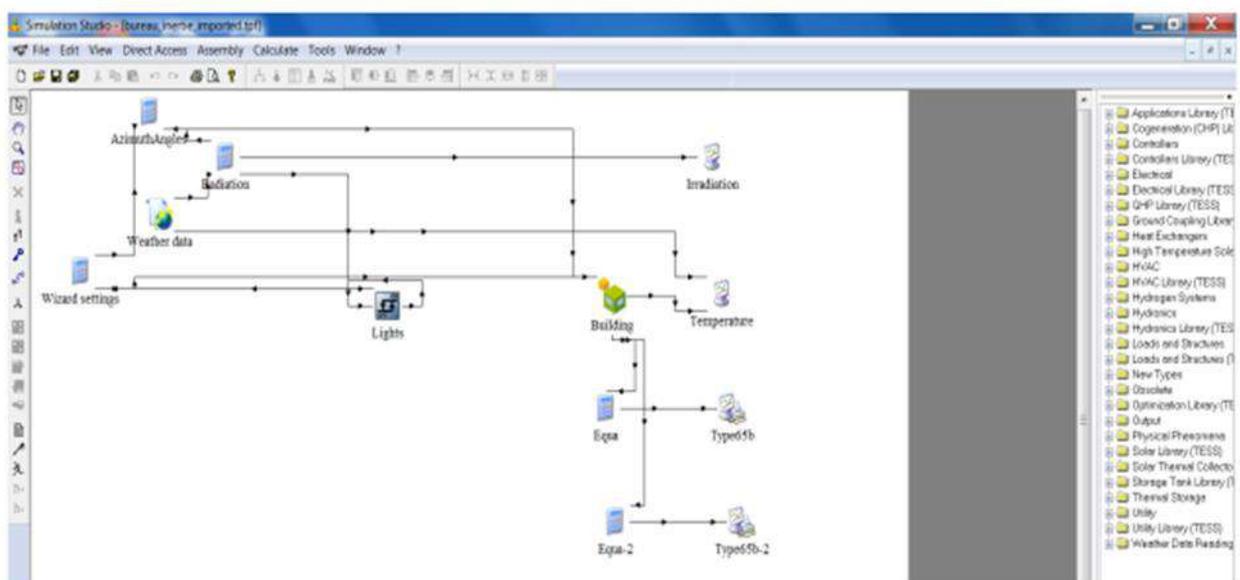


Fig.5.12. Interface graphique du logiciel TRNSYS

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Les composants sont identifiés par leurs types et les numéros des unités. Les types les plus utilisés pour la simulation dans le bâtiment sont :

Type 9 : Lecteur de données standard.

Type 16 : Processeur ou générateur d'ensoleillement.

Type 25 : Impression des données.

Type 33 : Lecture à partir du diagramme psychrométrique.

Type 54 : Générateur des données météorologiques.

Type 56 : Bâtiment multi zones (simuler le comportement thermique du bâtiment) à l'aide de TRNBuild.

Type 65 : Affichage des résultats.

Type 77 : Modélise la distribution verticale de la température du sol

5.4.3. TRNBuild

Pour la simulation thermique, nous allons nous servir du Type 56 dans la bibliothèque TRNSYS, ce type correspond au module de bâtiments multizones. Le Type 56 est très particulier parce qu'il possède sa propre interface de gestion des données nommée TRNBuild. C'est un logiciel de prétraitement des données qui permet de rentrer toutes les caractéristiques du bâtiment : dimensions des parois, caractéristiques des matériaux...etc.

Dans le modèle correspondant au Type 56, le bâtiment est représenté par un ensemble de nœuds modélisant des pièces ou des zones thermiques (groupement de pièces). Les bâtiments étudiés peuvent être décomposés en plusieurs zones distinctes (Hamdani et al., 2018).

Pour ce faire, il faut définir les zones, et pour chacune d'elles, définir les parois (opaques et vitrées), c'est-à-dire leurs compositions et leurs orientations, spécifier les gains, les infiltrations, la ventilation, le chauffage, la climatisation, le confort et l'humidité. Le logiciel propose une librairie sur les matériaux utilisés avec les paramètres correspondants : conductivités, capacités thermiques, épaisseurs, ce qui vous donne la densité et d'autres paramètres thermo physiques comme le montre la figure 5.13.

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

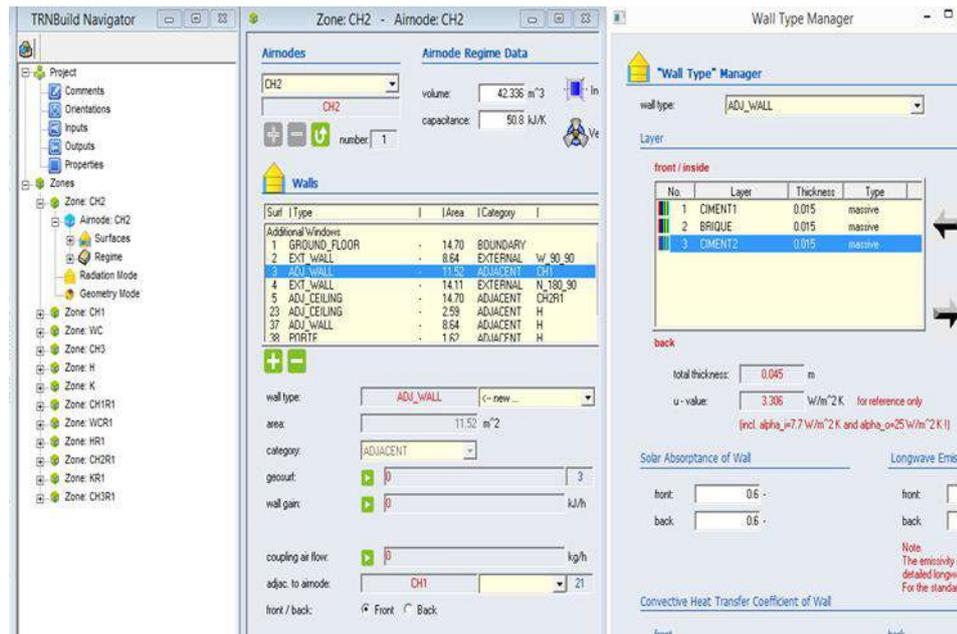


Fig.5.13. Interface graphique de TRNBuild

5.4.4. METEONORM

METEONORM est un logiciel développé par METEOTEST. Il fournit des bases de données météorologiques de différentes villes à travers le monde, et effectue des interpolations pour les sites non répertoriés (Fig.5.14). Concernant les données météo, le logiciel METEONORM permet de générer des fichiers de données, au format compatible avec TRNSYS, prenant en compte les données des stations météorologiques les plus proches. Ce logiciel est non seulement un recueil très complet de données météorologiques mais contient également des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe (Hamdani, 2016).

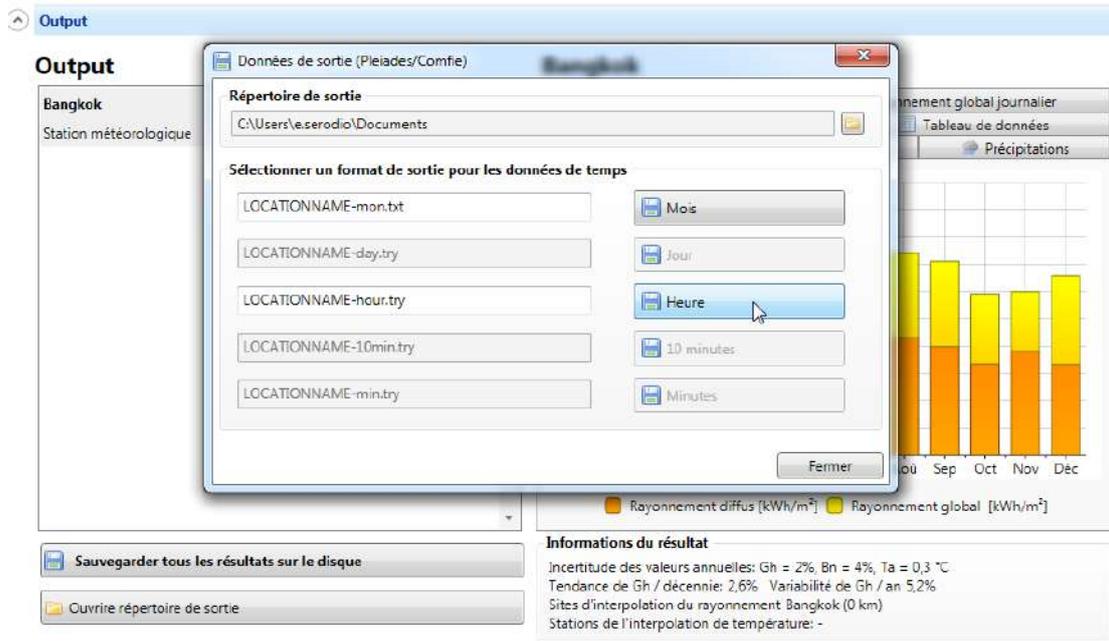


Fig.5.14. Création de fichier météo sur METEONORM

Traditionnellement les fichiers météorologiques pour la simulation de bâtiments sont fournis sous forme d'ensembles de données horaires dans une variété de formats.

Les simulations peuvent se faire sur une période de temps d'une année avec un pas de temps variable (couramment une heure).

5.5. Modélisation du bâtiment sous TRNSYS 18

La simulation a été réalisée en utilisant la dernière version du logiciel TRNSYS. La création de la géométrie en 3D de l'édifice a été réalisée par le plug-in TRNSYS3D dans Google SketchUp. Le comportement thermique de la maison est simulé à travers une modélisation transitoire multizone (type 56) avec un pas de temps de 1 heure.

5.5.1. Données météorologiques

La maison simulée est située à Ouargla (Latitude 31°55'N, Longitude 05°24'E, Altitude 141 m) qui est caractérisée par un climat désertique chaud (Classification de Köppen BWh) typique du désert du Sahara (Climate-Data.org, 2021). Les hivers sont souvent froids le matin et la nuit (minima à 3 °C), mais les températures augmentent très rapidement pendant la journée pour atteindre 25°C en moyenne. D'autre part, la période estivale est souvent chaude, avec des températures minimales de 25 à 28 °C et pendant la journée, la température dépasse 45 °C. Le Tableau 5.3 présente la température moyenne mensuelles, l'humidité relative moyenne mensuelle, la vitesse du vent moyen, ainsi que le

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

rayonnement solaire global enregistré à Ouargla depuis la station météorologique d'Ouargla pour l'année 2020.

Tableau.5.3. Données météorologiques d'Ouargla (Station Météo d'Ouargla 2020)

Mois	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Tmoy (°C)	RHmoy (%)	Vent moy (m/s)	Ray global (W/m ²)
Janvier	-1,0	26,1	12,6	47,5	2,3	339,2
Février	1,9	27,6	14,8	37,1	2,1	406,6
Mars	5,0	31,3	18,2	36,5	4,9	456,4
Avril	9,2	37,6	23,4	31,7	4,0	478,9
Mai	16,7	44,5	30,6	20,9	4,1	486,0
Juin	21,7	46,6	34,2	18,6	3,6	518,5
Juillet	23,6	47,8	35,7	18,8	3,4	517,4
Août	24,2	47,5	35,9	18,0	3,0	515,6
Septembre	21,9	42,7	32,3	31,3	3,2	452,9
Octobre	12,3	38,8	25,6	38,9	2,8	404,2
Novembre	2,7	31,7	17,2	39,7	1,7	358,1
Décembre	1,5	26,2	13,9	47,4	2,7	309,2

5.5.2. Démarche (déroulement) de la simulation

Le processus de simulation dans le logiciel TRNSYS passe par les démarches classiques de modélisation numérique reconnues dans la littérature. Le déroulement de la simulation avec le logiciel TRNSYS 18 s'effectue selon quatre étapes importantes comme il est représenté sur la figure 5.15.

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

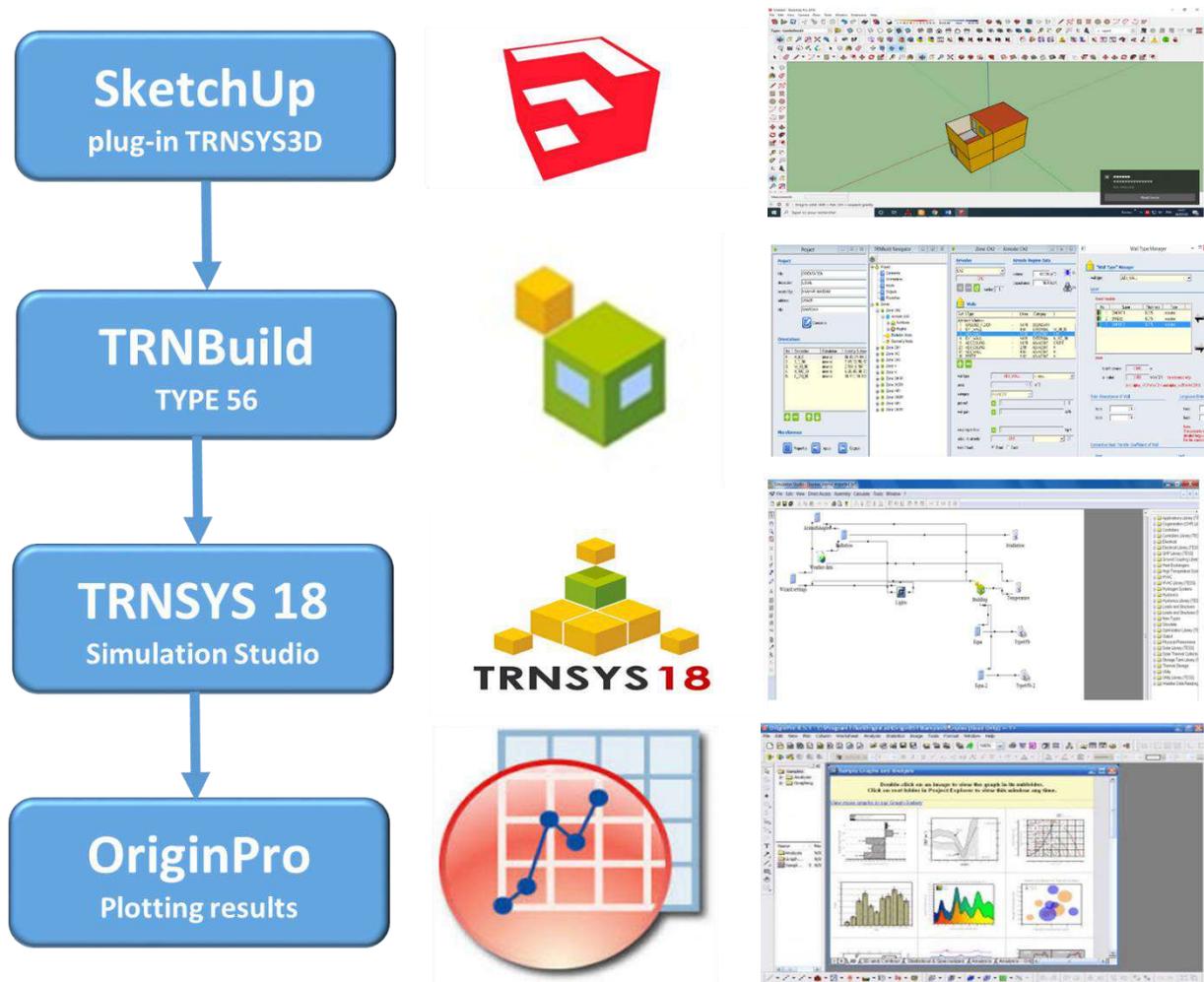


Fig.5.15. Schéma des étapes de la simulation

a) Première étape

○ Création de fichier climatique pour le site d'Ouargla

On a d'abord commencé par l'introduction des données météorologiques de la ville d'Ouargla, car elle ne figure pas dans la bibliothèque du TRNSYS. Le Type15 permet de générer les données météorologiques heure par heure : la température de l'air extérieur, la température du ciel, l'humidité relative de l'air extérieur, le rayonnement solaire global, le rayonnement solaire direct incident, l'angle d'incidence. Nous avons les données horaires de la station météorologique d'Ouargla. Cette station a une Latitude de 31.93° , une Longitude de 5.40° et une Altitude de 141 m.

Dans notre cas, on s'intéresse particulièrement aux températures intérieures de l'habitat. Pour cela nous avons utilisé le fichier météo d'Ouargla. Ce fichier sous format (*.epw) comprend les valeurs du rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse et

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

la direction du vent, et des informations propres au site d'Ouargla comme la latitude, la longitude et l'altitude du lieu.

○ Création d'un modèle 3D à l'aide du TRNSYS3D dans Google SketchUp

La création de la géométrie en 3D de la salle souterraine étudiée et la salle au-dessus du sol a été réalisée par le plug-in TRNSYS3D dans Google SketchUp (génération d'un fichier *.idf) (Fig.5.16).

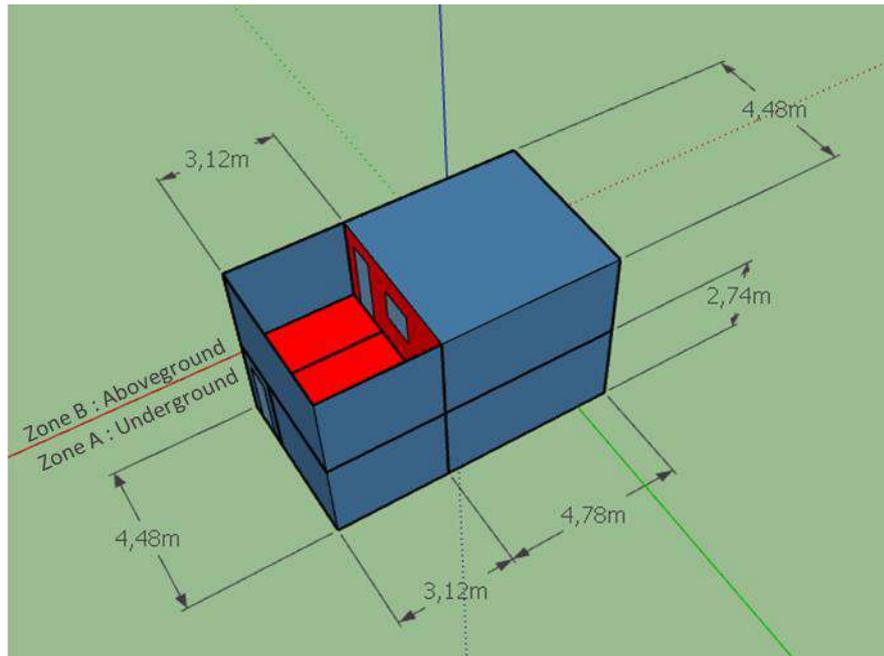


Fig.5.16. Modèle 3D de la salle souterraine étudiée et la salle au-dessus du sol sous Google SketchUp

La représentation de l'édifice sous le programme SketchUp est souple et flexible, elle permet de montrer les façades du bâti d'une manière opaque, semi-transparente et faire apparaître même les cloisons avec une couleur différente.

Cette astuce permet au concepteur de distinguer les murs extérieurs des murs intérieurs (fig.5.17). Les différentes zones du bâtiment peuvent être affichées sélectivement pour détecter facilement les erreurs éventuelles.

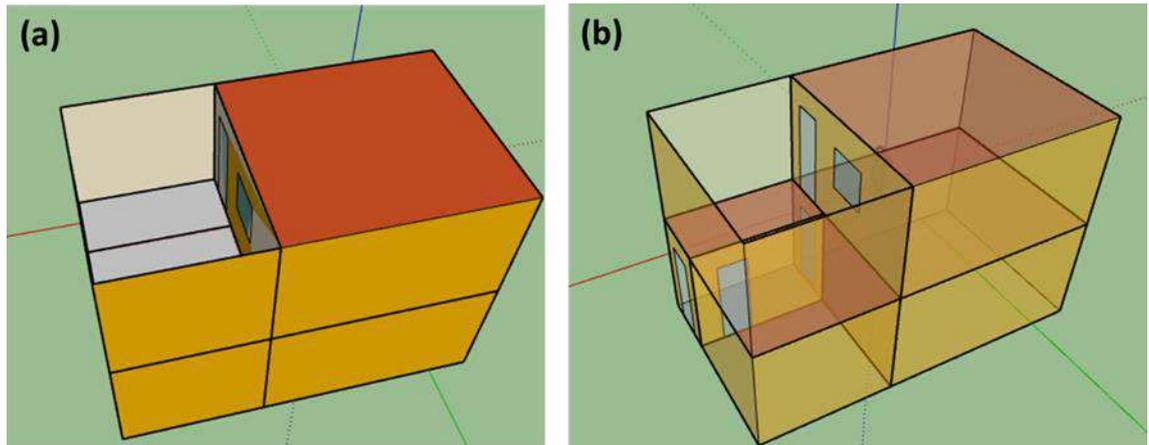


Fig.5.17. Maquette numérique du Studio : (a) Plan opaque, (b) plan semi-transparent

Avec l'apparition de Google SketchUp, les informations géométriques seront centralisées et structurées dans un seul support, il présente une réelle opportunité pour effectuer automatiquement une passerelle entre la définition géométrique d'un projet et l'outil de simulation thermique dynamique.

b) Deuxième étape

La description détaillée du bâtiment étudié dans l'interface TRNBuild issue du modèle multizone (Type 56). Cette étape consiste à :

○ Définir l'orientation du bâtiment

Nous devons spécifier l'orientation de notre bâtiment par rapport au Nord. Par défaut, le Nord est confondu avec la direction de l'axe vert du repère absolu de l'application et a comme valeur 0° . Par défaut également, l'axe du Nord est non visible. Pour l'afficher, il faut aller dans le menu par le bouton situé à droite de la fenêtre et on peut par la suite modifier les orientations.

○ Etablir les zones thermiques du bâtiment

Notre maison souterraine est divisée en quatre zones thermiques l'entrée, les escaliers, le couloir et le salon qui a une superficie de $21,41 \text{ m}^2$ et une profondeur de $2,34 \text{ m}$ et $0,4 \text{ m}$ au-dessus du sol (soit une hauteur de toiture de $2,74 \text{ m}$). La température de l'air est supposée uniforme dans chaque zone. La géométrie du bâtiment a été saisie par le logiciel Google SketchUp et ensuite enregistrée à l'aide d'un plug-in TRNSYS3D et qui peut être importée au TRNSYS 18. Cela permet un calcul plus rapide et plus précis.

○ Définir la composition des parois (matériaux de construction)

Après la définition des zones, il est impératif de définir les caractéristiques de chacune des parois de chaque zone (Fig.5.18).

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

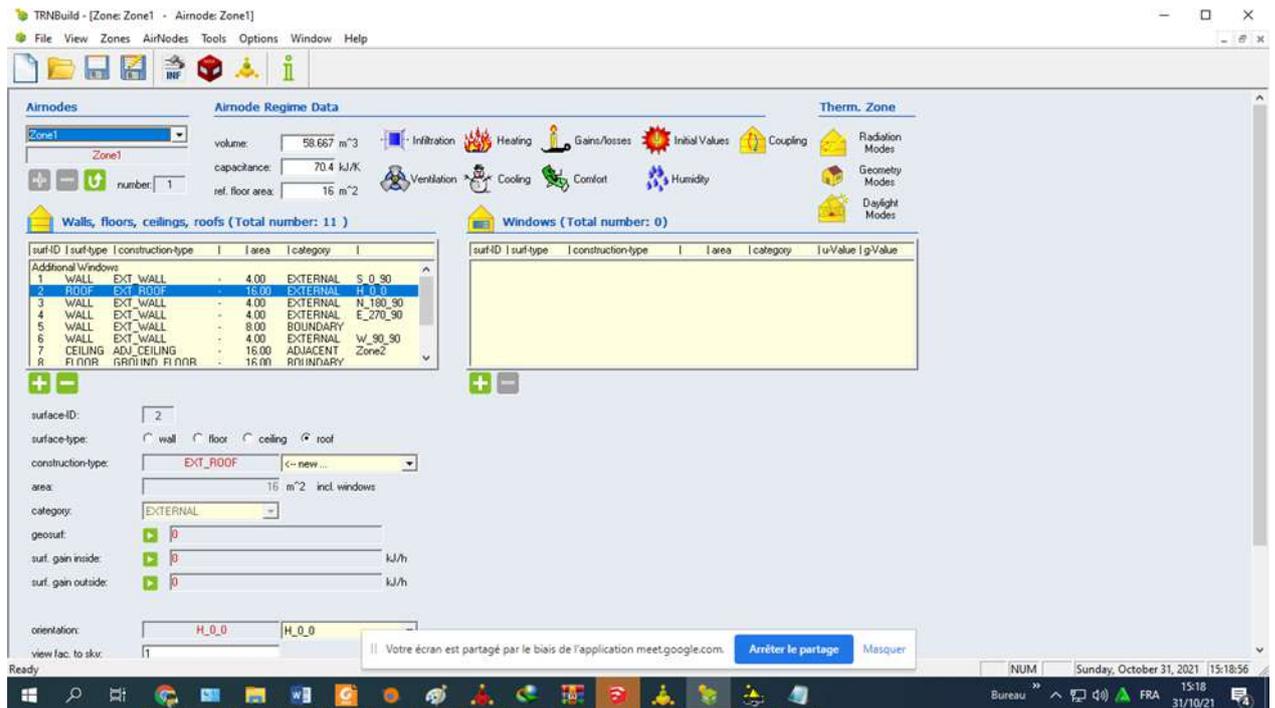


Fig.5.18. Définir la composition des parois sur TRNBuild

Les propriétés thermiques et physiques des éléments de construction sont presque les mêmes pour la plupart des bâtiments de la région. Les matériaux de construction utilisés sont disponibles localement. Le tableau 5.4 décrit les types d'éléments de construction différents et contient la description de chaque type de construction (murs, toit et plancher bas).

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Tableau.5.4. Caractéristiques et propriétés thermo-physiques des différentes parois (Bekkouche et al., 2009)

Parois	Composition	Epaisseur (m)	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (Kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ k ⁻¹)	U (Wm ⁻² K ⁻¹)
Mur extérieur	Mortier de ciment	0.015	1.40	1800	1000	90,9
	Pierre	0.400	2.30	2000	1000	5,7
	Mortier de ciment	0.015	1.40	1800	1000	90,9
	Plâtre	0.010	0.56	1400	1000	55,6
Mur intérieur	Mortier de ciment	0.015	1.40	1800	1000	90,9
	Plâtre argile	0.010	0.45	1200	840	45,5
	Pierre	0.150	2.30	2000	1000	15,4
	Plâtre argile	0.010	0.45	1800	1000	45,5
	Mortier de ciment	0.015	1.40	1800	1000	90,9
Plancher	Carrelage	0.025	2.10	2300	875	250,0
	Ciment	0.020	1.40	1800	1000	71,4
	Béton dense	0.200	2.40	2400	800	12,0
Toit	Plâtre	0.015	0.56	1400	1000	37,0
	Béton léger	0.120	0.33	800	719	2,7
	Mortier de ciment	0.015	1.40	1800	1000	90,9

c) Troisième étape

Cette étape concerne le lancement de simulation sur TRNSYS Studio avec un pas de temps d'une heure. TRNSYS 18 offre à travers une interface graphique interactive, la possibilité de coupler les éléments sources présentés sur la figure 5.19.

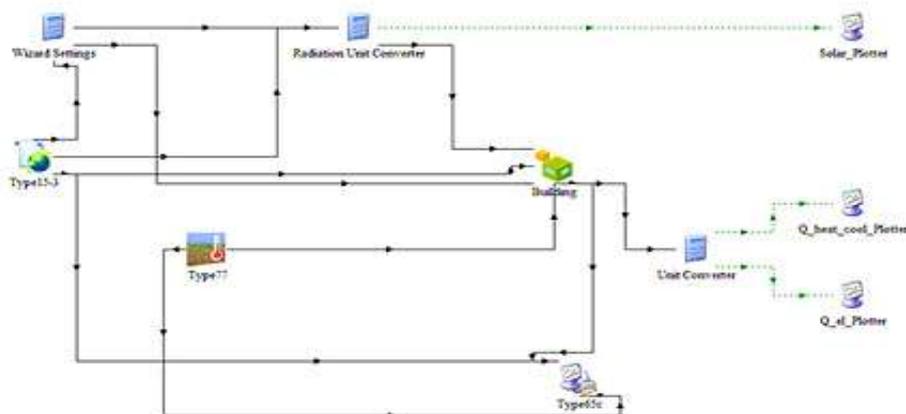


Fig.5.19. Simulation sous TRNSYS studio

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Pour prendre en compte les gains et les pertes thermiques qui se créent avec le sol, nous avons ajouté le TYPE 77 qui modélise la distribution verticale de la température du sol.

d) Quatrième étape

La dernière étape concerne la lecture et la visualisation des résultats de la simulation par le biais du type 65 (sortie graphique) et elle permet aussi de les exporter sous format *.csv à l'aide du type 25 (sortie numérique). Cependant, pour effectuer une représentation plus lucide, il faut avoir recours à un programme d'analyse de données et de représentation graphique. Pour notre cas, nous avons opté pour OriginPro 9.1.

5.6. Résultats et discussion

5.6.1. Validation expérimentale et confrontation des températures

La validation de l'étude de cas est basée sur la comparaison entre la température intérieure simulée et mesurée de la pièce souterraine. Pour garantir une comparaison constructive, il est suffisant de se limiter à une courte période de quatre jours comme dans notre cas.

La figure.5.20 illustre la comparaison des mesures et simulations des températures intérieures horaires du local souterrain d'une part et de la température horaire de l'air extérieur, d'autre part, pendant quatre jours du 20 au 23 août 2020. Les résultats montrent un bon accord entre les mesures et la simulation de la température intérieure.

La variation de la température extérieure se trouve dans la plage de 28 à 47 °C. La température extérieure a été loin de la zone de confort en termes de température. Pour la température intérieure, sa plage de variation était petite par rapport à la température extérieure ou elle est relativement constante et située entre 28 et 29 °C. Ces températures sont inférieures aux températures de confort intérieur les plus élevées du mois d'août pour les régions du Sud Algérien calculées par Semahi et al. (Semahi et al., 2019), qui était d'environ 30,6 °C.

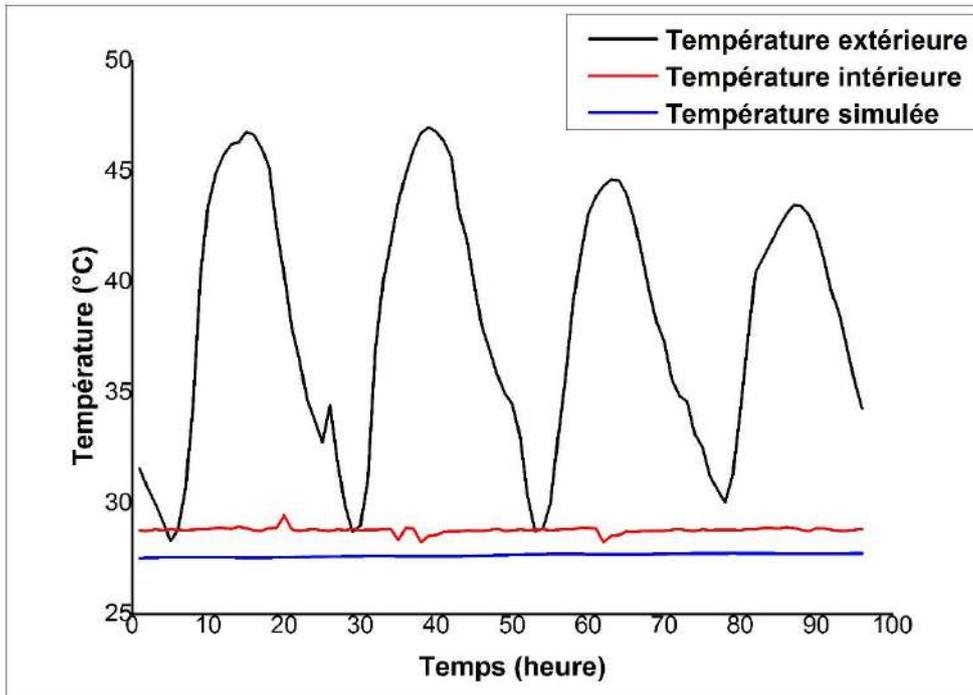


Fig.5.20. Variation de la température extérieure et intérieure moyenne horaire

Deux tests statistiques l'erreur de biais moyen (MBE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été calculés. Ceux-ci sont définis comme suit :

$$MBE = \frac{1}{\hat{T}_m} \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{T}_i) \tag{5.1}$$

$$RMSE = \frac{1}{\hat{T}_m} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{T}_i)^2} \tag{5.2}$$

Où T_i est la i ème valeur estimée, \hat{T}_i est la i ème valeur mesurée, \hat{T}_m est la valeur moyenne mesurée et N est le nombre d'observations. On peut voir que le MBE est de -3,93% et la valeur RMSE est de 3,97%, alors que selon ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002) la limite admise est de $\pm 10\%$ et 30% respectivement. Démontrant ainsi que l'approche informatique permet d'examiner les performances thermiques annuelles d'un bâtiment enterré.

Pour expliquer l'avis de confort à l'intérieur de la salle souterraine, nous avons calculé la différence des températures moyennes horaires entre l'intérieur et l'extérieur ($\Delta T = T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}}$) pendant la période de mesures du 20 au 23 août 2020.

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

L'analyse des écarts des températures intérieures et extérieures sont donnés en termes de performance thermique intérieure de la salle souterraine étudiée (Fig.5.21). Les valeurs des écarts se situaient entre 10 °C et 18 °C pendant la journée (de 09h00 à 17h00) à cause de la vitesse du vent et de la variation du rayonnement solaire et les valeurs les plus basses apparaissant très tôt le matin (de 03h00 à 07h00).

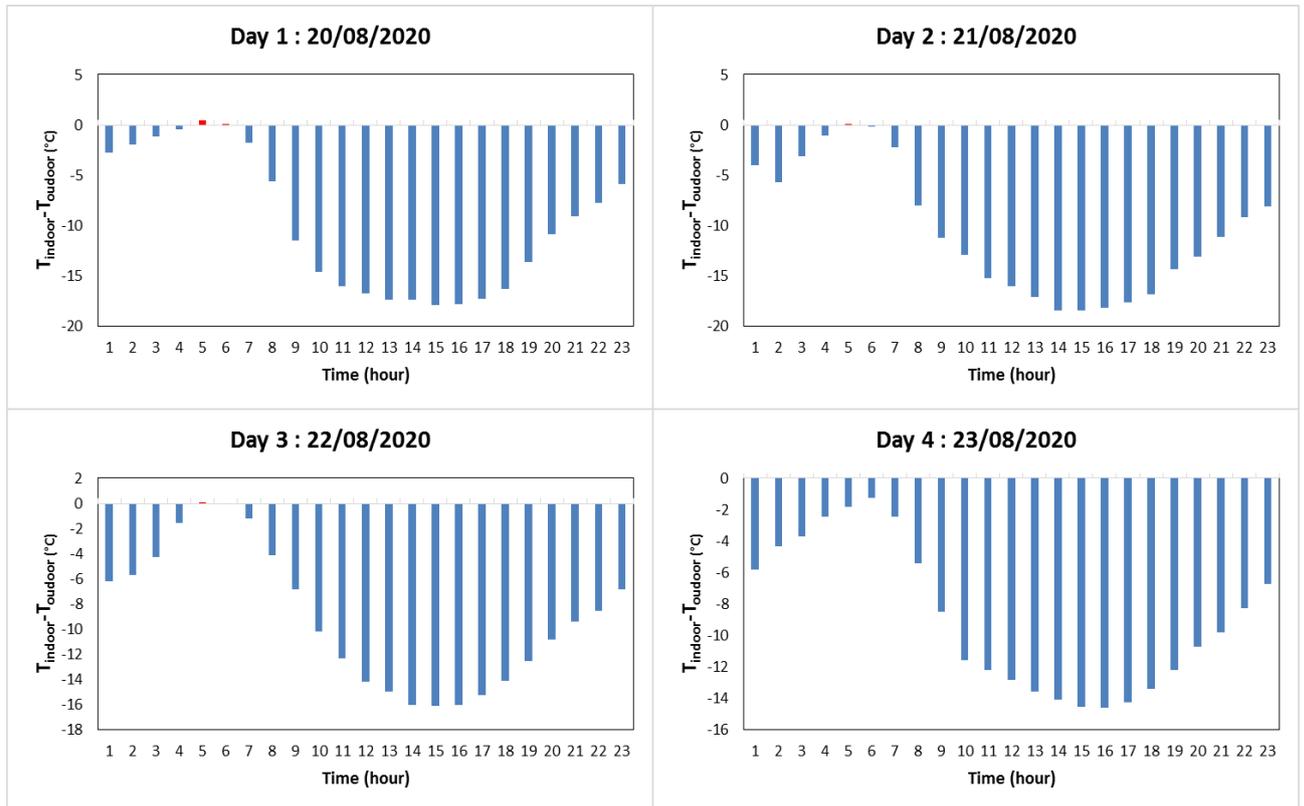


Fig.5.21. Écart des températures horaires intérieures et extérieures

5.6.2. Évaluation du confort thermique

Le confort thermique décrit la satisfaction en fonction non seulement de la température ambiante, mais aussi de l'humidité relative. La Figure.5.22 montre la comparaison entre les mesures d'humidité relative intérieure horaire de la pièce souterraine et l'humidité relative extérieure pendant quatre jours du 20 au 23 août 2020. L'humidité relative intérieure est affectée par les occupants et les quelques ouvertures dans la pièce souterraine, à l'exception d'une porte et d'un conduit de ventilation, ces deux ouvertures ont un impact négatif sur le taux d'humidité relative. Cependant, l'humidité relative intérieure moyenne était inférieure à 25%, d'où cette valeur permet d'offrir un confort thermique à la maison.

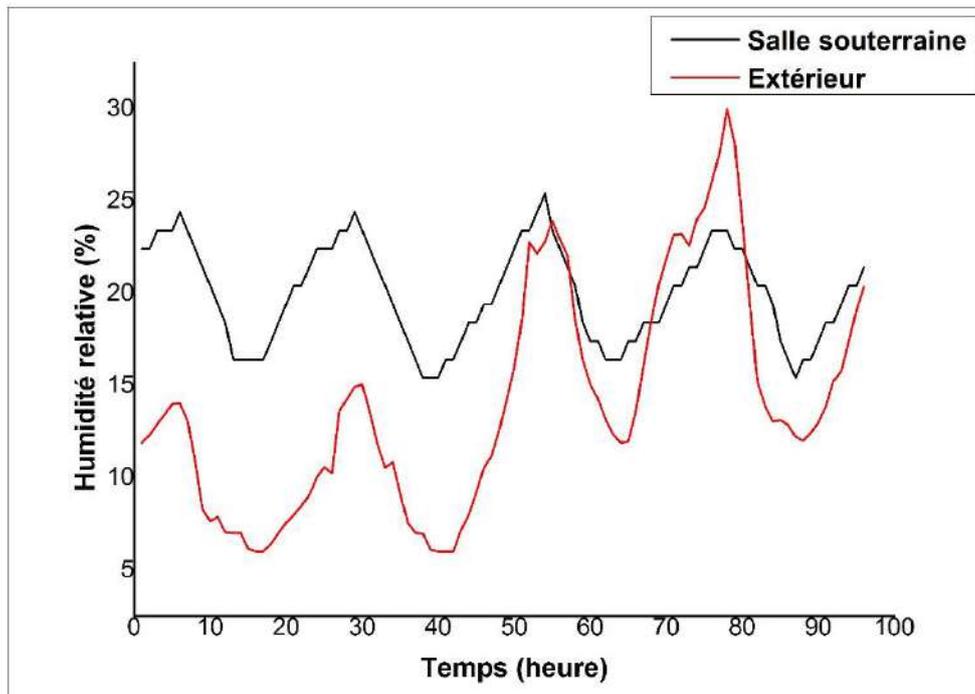


Fig.5.22. Variation de l'humidité relative extérieure et intérieure moyenne horaire

Pour l'humidité relative horaire $\Delta HR = HR_{\text{indoor}} - HR_{\text{outdoor}}$ a été calculée. La figure.5.23 montre les tendances horaires de l'humidité relative intérieure et extérieure de la salle souterraine. L'écart était assez élevé entre 00h00 et 05h00 et entre 19h00 et 23h00 les deux premiers jours (Le 20 et le 21/08/2020) qui nécessite la ventilation nocturne avec des moyens de refroidissement naturels ou mécaniques.

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

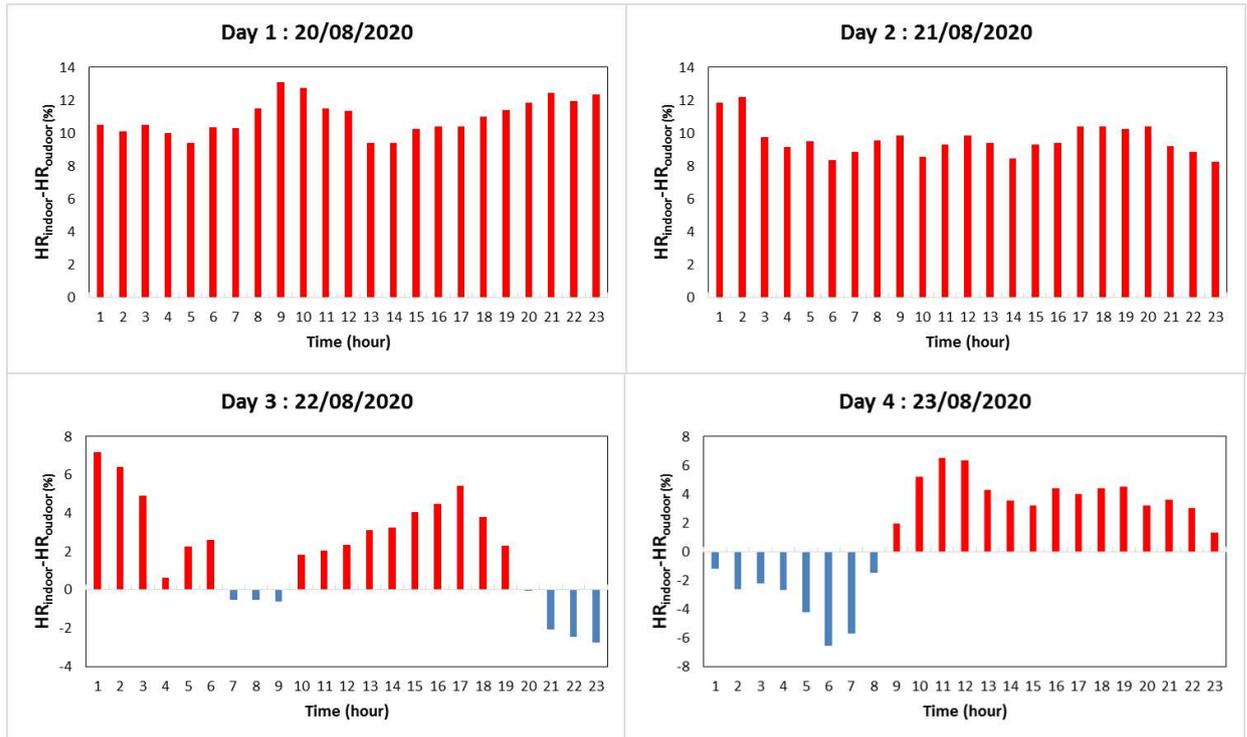


Fig.5.23. Écart de l'humidité relative horaire intérieure et extérieure

Sur la base des valeurs mesurées, et pour évaluer le confort thermique à l'intérieur de la salle souterraine une projection sur les diagrammes psychométriques, conformément aux normes ASHRAE Standard 55-2020 et EN-16798 a été réalisée sur la période d'étude du 20 au 23/08/2020 :

- **Situation du confort le 20/08/2020**

Les paramètres du confort thermique présent pour cette journée sont indiqués dans le tableau 5.5 ci-après :

Tableau.5.5. Paramètres du confort thermique le 20/08/2020

Paramètres (unité)	Liés à/au	Valeur
Température intérieure (°C)		28.8°C
Température radiante (°C)	Bâtiment	27°C
Humidité relative (%)		22.4%
Vitesse de l'air (m/s)		0.1 m/s
Métabolique (Met)	Occupant	1 Met
Habillement (clo)		0.5 clo

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

La figure.5.24 montre la situation du confort thermique dans la salle souterraine durant le premier jour de mesure (le 20/08/2020). D'après les résultats de deux diagrammes conformément aux normes (a) ASHRAE 55-2020 (Méthode PMV) et (b) EN-16798, la température opérative se situe à l'intérieur de la zone de confort, donc le confort est nettement assuré.

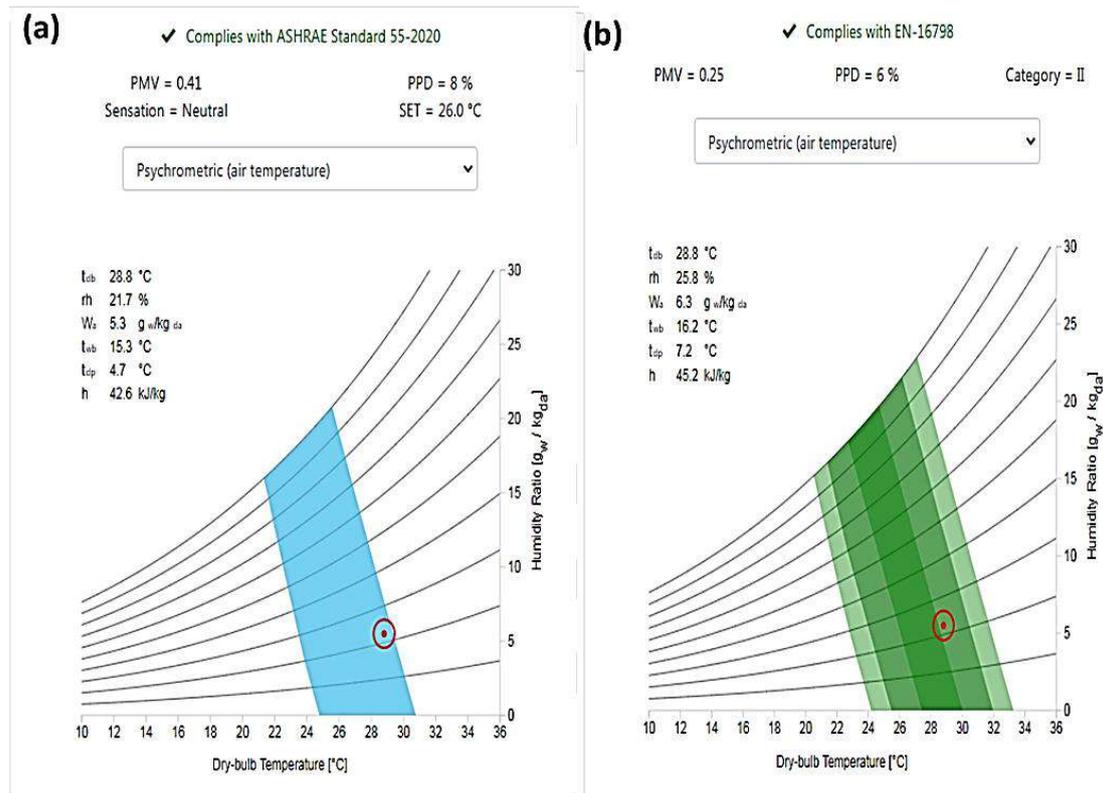


Fig.5.24. Situation du confort le 20/08/2020 sur les diagrammes psychrométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798

○ Situation du confort le 21/08/2020

Les paramètres du confort thermique présent pour cette journée sont indiqués dans le tableau 5.6 ci-après :

Tableau.5.6. Paramètres du confort thermique le 21/08/2020

Paramètres (unité)	Liés à/au	Valeur
Température intérieure (°C)		28.5°C
Température radiante (°C)	Bâtiment	27°C
Humidité relative (%)		20.3%
Vitesse de l'air (m/s)		0.1 m/s
Métabolique (Met)	Occupant	1 Met
Habillement (clo)		0.5 clo

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Presque la même situation météorologique du premier jour a été observée le deuxième jour (le 21/08/2020). La figure.5.25 confirme les mêmes résultats avec une sensation légère d'hygrométrie pendant la période nocturne.

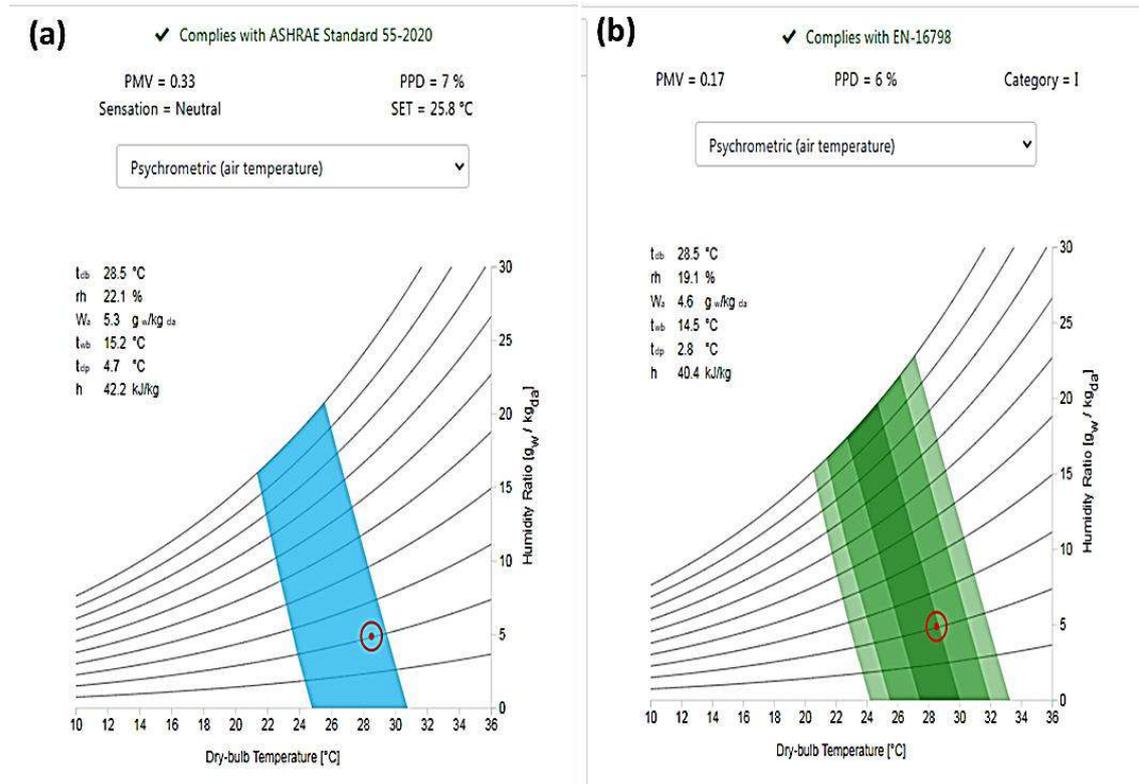


Fig.5.25. Situation du confort le 21/08/2020 sur les diagrammes psychrométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798

○ **Situation du confort le 22/08/2020**

Les paramètres du confort thermique présent pour cette journée sont indiqués dans le tableau 5.7 ci-après :

Tableau.5.7. Paramètres du confort thermique le 22/08/2020

Paramètres (unité)	Liés à/au	Valeur
Température intérieure (°C)		28.1°C
Température radiante (°C)	Bâtiment	27°C
Humidité relative (%)		19.4%
Vitesse de l'air (m/s)		0.1 m/s
Métabolique (Met)	Occupant	1 Met
Habillement (clo)		0.5 clo

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

D'après la figure.5.26, le confort est assuré dans le troisième jour (le 22/08/2020) et sa plage a été étalée après la réduction de taux d'humidité et répond totalement aux exigences de la norme ASHRAE 55-2020.

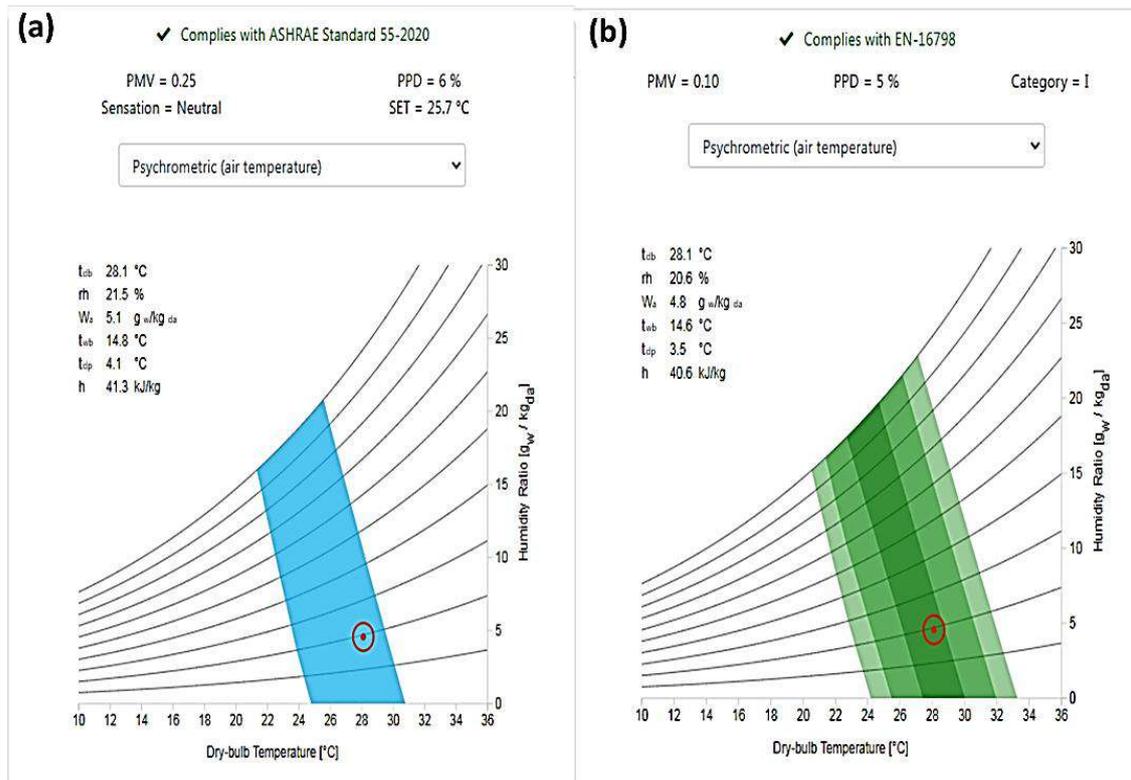


Fig.5.26. Situation du confort le 22/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798

○ **Situation du confort le 23/08/2020**

Les paramètres du confort thermique présent pour cette journée sont indiqués dans le tableau 5.8 ci-après :

Tableau.5.8. Paramètres du confort thermique le 23/08/2020

Paramètres (unité)	Liés à/au	Valeur
Température intérieure (°C)		27.7°C
Température radiante (°C)	Bâtiment	27°C
Humidité relative (%)		17.4%
Vitesse de l'air (m/s)		0.1 m/s
Métabolique (Met)	Occupant	1 Met
Habillement (clo)		0.5 clo

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

La situation du quatrième jour (le 23/08/2020) est presque identique de celle du troisième jour. La Figure.5.27 confirme l'étalement de la plage du confort durant cette journée estivale.

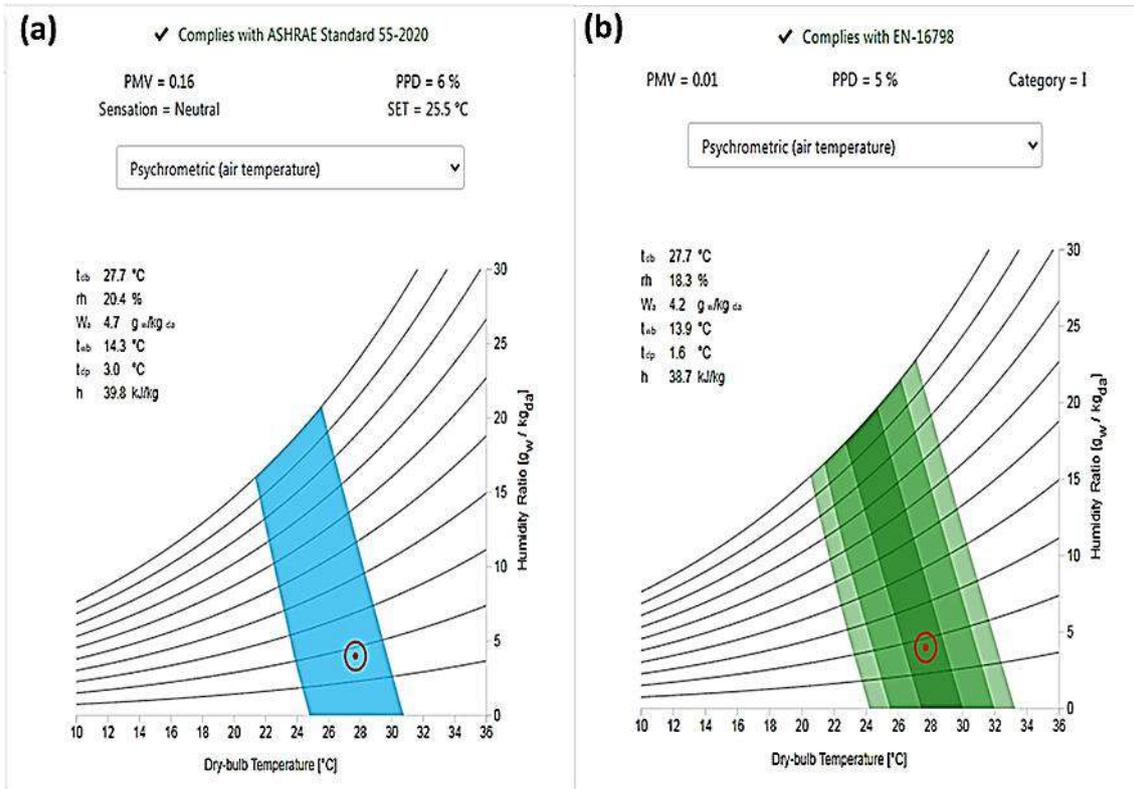


Fig.5.27. Situation du confort le 23/08/2020 sur les diagrammes psychométriques : (a) ASHRAE 55-2020 et (b) EN-16798

5.6.3. Effet de l'orientation sur les températures intérieures

L'orientation d'un bâtiment est la direction vers laquelle sont tournées ses façades (la direction perpendiculaire à l'axe des blocs). L'orientation se rapporte à l'angle d'azimut d'une surface à Nord vrai relatif; la direction générale dans laquelle une surface fait face.

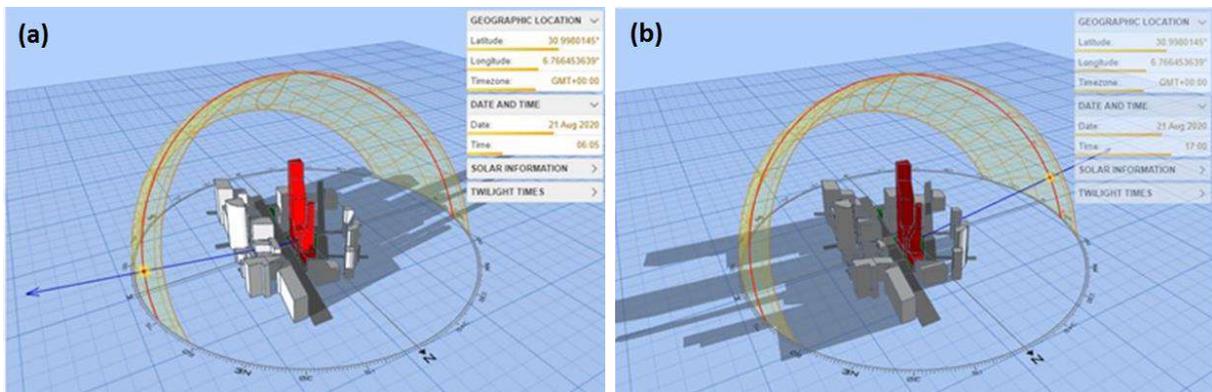


Fig.5.28. Trajectoire solaire d'Ouargla le 21/08/2020 : (a) Lever du soleil (b) coucher du soleil. [<http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>].

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

L'orientation réelle est habituellement donnée en degrés du Nord (à partir de l'orientation Nord), elles peuvent également être données en général des directions telles que (N) du Nord, (S) du Sud, (E) du Est, (W) de l'Ouest.

Nous avons étudié l'influence de l'orientation de l'enveloppe du bâtiment sur les températures de l'ambiance intérieure. En faisant varier chaque fois l'orientation du bâtiment par 90° vers l'Est ou vers l'Ouest. L'orientation de l'habitat par exemple vers l'Ouest par 90° , permet de rendre le mur Sud en Ouest, le mur Ouest en Nord, le mur Nord en Est et le mur Est devient en Sud.

La journée du 21 Août 2020 a été sélectionnée pour effectuer la simulation numérique, afin d'apprécier l'impact de l'orientation de l'habitat souterrain sur ses températures intérieures. La figure 5.29 décrit aussi les variations journalières de la température de l'air intérieur de la salle souterraine pour les trois autres rotations: vers l'Est, vers l'Ouest et vers le Nord.

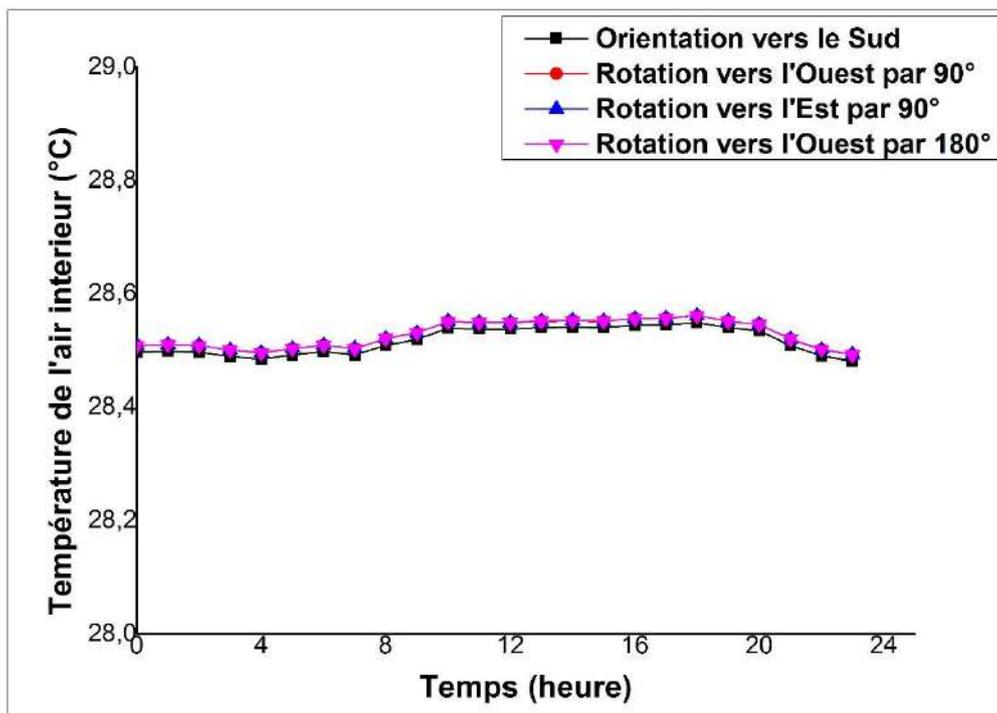


Fig.5.29. Température de l'air intérieur de la salle souterraine avec différentes orientations, le 21 août 2020

Les résultats montrent l'orientation d'une habitation souterraine n'influe pas considérablement sur la température intérieure, cela est dû au fait que les parois ne sont pas exposées au rayonnement solaire direct qui n'a pas eu d'effet directement sur la variation de la température intérieure.

5.6.4. Comparaison des charges thermiques

Les températures de la salle souterraine et de la salle au-dessus du sol ont été simulées pendant une année et avec un pas de temps de 1 heure, comme présenté sur la Figure.5.30. On peut remarquer que la température ambiante souterraine à une profondeur de 2,34 m est bien inférieure à la température ambiante au-dessus du sol pendant les mois les plus chauds et bien supérieurs à la température ambiante au-dessus du sol pendant les mois les plus froids, avec une déviation maximale pouvant atteindre 12 °C. En raison des très faibles déperditions thermiques, la température horaire de la pièce souterraine varie d'un maximum d'environ 27,5 °C de juin à août, et d'un minimum d'environ 12 °C de décembre à février.

En comparaison avec la salle au-dessus qui est adjacente aux conditions climatiques extérieures très dures. La chaleur causée par les infiltrations d'air, la chaleur transmise par les murs extérieurs et les gains solaires sont à l'origine de la fluctuation et des valeurs les plus élevées de la température ambiante au-dessus du sol tout au long de l'année avec un maximum moyen d'environ 37 °C pendant les mois les plus chauds.

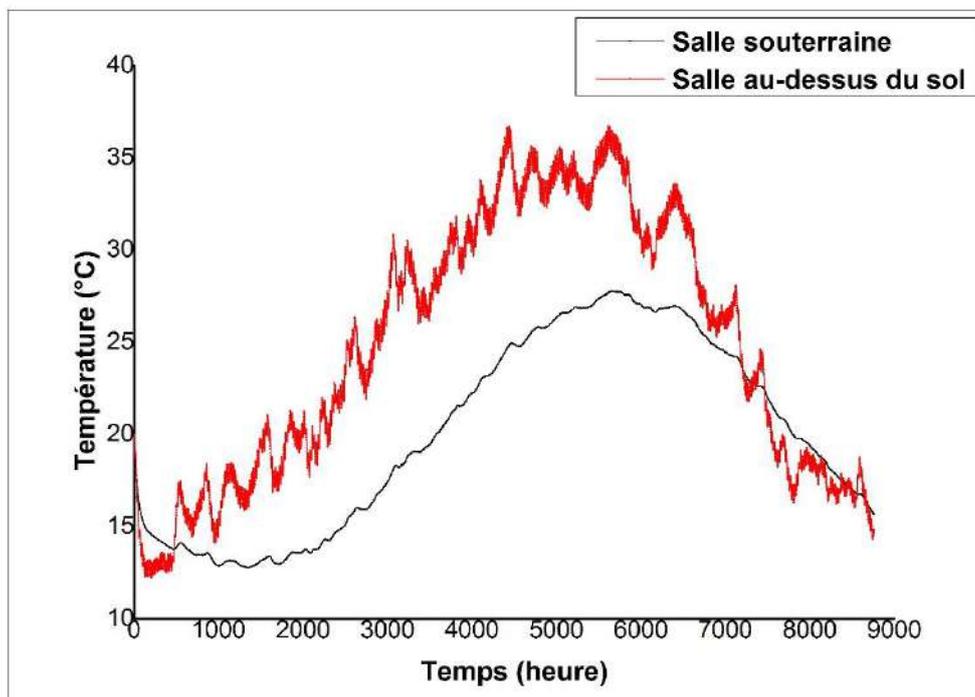


Fig.5.30. Comparaison entre la température horaire de la salle souterraine et de la salle au-dessus du sol

5.6.5. Besoin énergétique en chauffage et en climatisation

Il est important de connaître les besoins énergétiques en chauffage et en climatisation des bâtiments afin de concevoir le système optimal dans chaque cas pour minimiser le coût de la consommation énergétique.

Les besoins énergétiques en chauffage et en climatisation de la salle souterraine et de la salle au-dessus du sol ont été simulés pendant une année et avec un pas de temps de 1 heure (Figure 5.31).

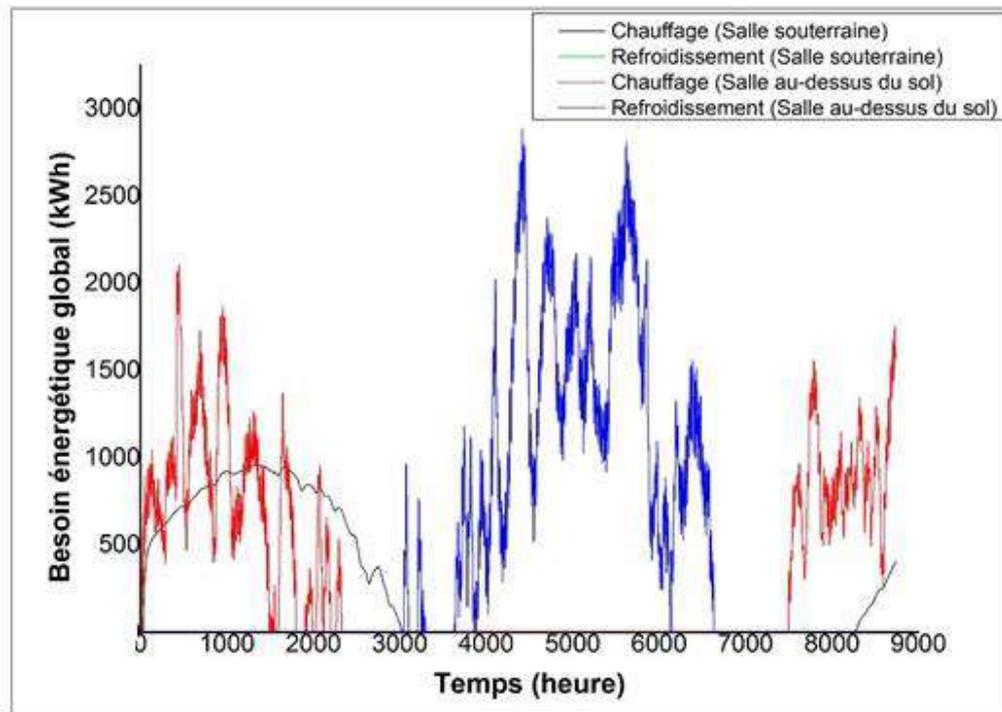


Fig.5.31. Besoins annuels en chauffage et en climatisation

Les charges mensuelles de chauffage et de climatisation de la salle souterraine et la salle au-dessus sur la base de la zone de confort thermique normale entre une température de 21 °C en hiver et de 27 °C en été requise par la norme DTRC3-4 (Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments : Climatisation) (DTR C3.4, 1998). Cette zone de confort peut être étendue de ± 2 °C. Selon les résultats présentés dans la Figure 5.32, les gens peuvent vivre dans la pièce souterraine sans aucun système de refroidissement en raison de la demande de charge de refroidissement nulle. Cependant, la pièce au-dessus du sol nécessite une quantité d'énergie de refroidissement beaucoup plus importante pour maintenir une température confortable en période estivale, autour de 2780.5 kWh en juillet. Ceci est

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

en grande partie dû à la température très élevée pendant cette période estivale. De plus, les demandes de chauffage ne sont pas importantes dans les deux cas et ne dépassent pas 200 kWh en période hivernale.

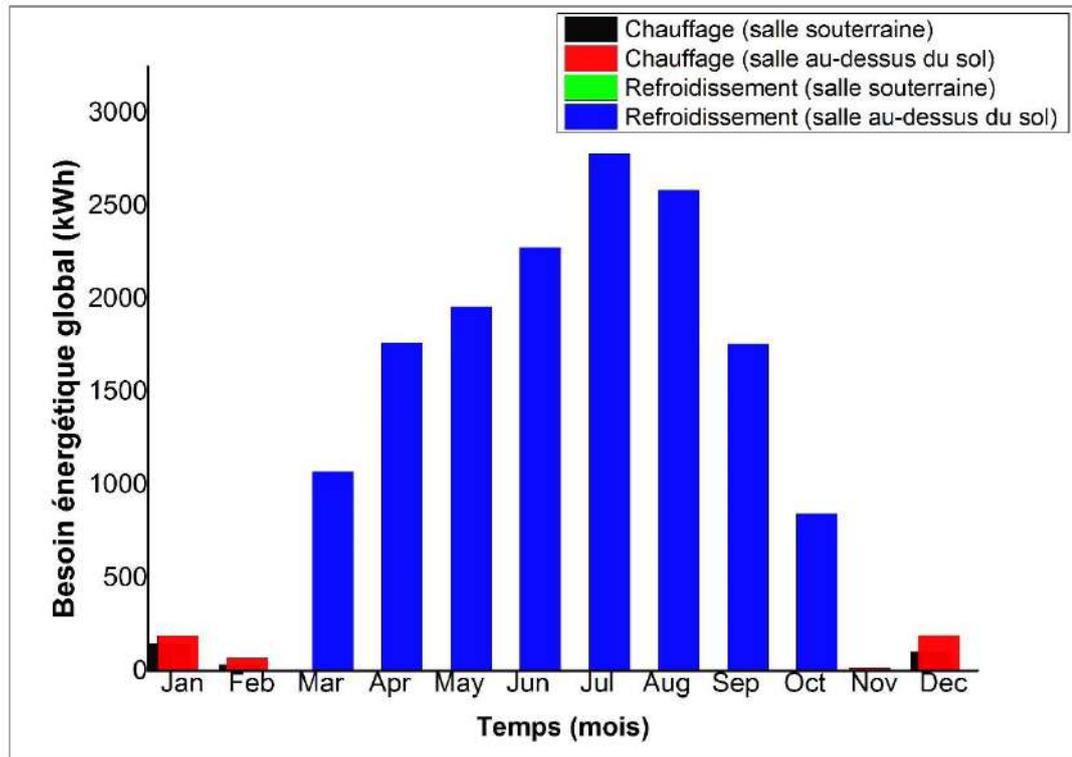


Fig.5.32. Besoins mensuels en chauffage et en refroidissement

La consommation d'énergie électrique a été calculée conformément à la méthode utilisée par la Société Nationale d'Electricité et du Gaz (SONELGAZ). Les besoins énergétiques annuels et mensuels ont été évalués en Kilowattheures (kWh) puis convertis en Dinar Algérien (DZD) et en Dollar Américain (USD). Le prix réel du kWh appliqué par l'État Algérien est de 10.54 DZD/ kWh (0.076 USD) et son prix de vente moyen est de l'ordre de 4.01 DZD/kWh (0.029 USD) (Kadraoui, 2019). Le prix de l'électricité pour les clients basse tension a été défini par la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) comme suit :

- **Tranche 1:** Consommation électrique inférieure ou égale à 125 kWh, facturée à un tarif de 1.779 DA/kWh (0.013 USD);
- **Tranche 2:** Consommation électrique comprise entre 125 kWh et 250 kWh inclus, facturée à un tarif de 4.1789 DA/ kWh (0,030 USD);

- **Tranche 3:** Consommation électrique comprise entre 250 kWh et 1000 kWh inclus, facturée à un tarif de 4.8120 DA/ kWh (0,034 USD);
- **Tranche 4:** Consommation électrique supérieure à 1000 kWh, facturée à un tarif de 5,4796 DA/ kWh (0,039 USD).

Dans le cadre de la politique de l'Etat Algérien pour le soutien aux populations du Sud, une réduction de 50% sur les consommations de l'énergie électrique a été adoptée, au bénéfice des clients basse et moyenne tension (CREG, 2019).

5.7. Étude économique

Les résultats numériques et expérimentaux de cette étude sont très encourageants, car ils permettent de confirmer la contribution de ce type de construction dans le confort d'été dans les conditions climatiques difficiles de la ville d'Ouargla.

Les bons résultats du projet ne signifient pas toujours qu'il est bon économiquement, car toute personne, s'il veut construire cette construction (même avec la simplicité de la conception), voudrait savoir si ce projet sera rentable économiquement. Nous devons donc savoir où ira notre argent, spécialement s'il existe d'autres solutions plus faciles et moins chers.

L'étude économique constitue un élément clé pour l'évaluation d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un bâtiment. En effet, plusieurs méthodes ont été proposées par la littérature. La méthode la plus simple est le temps de retour sur investissement où elle a été adoptée dans cette étude.

5.7.1. Besoins en climatisation

Dans cette étude de cas, les besoins annuels de chauffage sont ignorés, car le refroidissement est plus coûteux que le chauffage, parce que le gaz est la principale source de chaleur en Algérie avec un coût inférieur à celui de l'électricité.

Les résultats des mesures thermiques qui ont été effectuées durant la période la plus défavorable d'été (mois d'août) sur le comportement thermique de la salle souterraine, montrent que le confort thermique normal ($T=28.5$ °C) est assuré sans le recours à l'utilisation d'un système de climatisation. Cependant, pour assurer un confort amélioré au cours de la période d'été tel que défini dans le DTR C 3.4 ($T=27$ °C), les besoins en climatisation ont été estimés à l'aide d'un logiciel de simulation TRNSYS 18.

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

Les besoins énergétiques mensuels en climatisation pour la période chaude, qui servent à assurer un confort amélioré sont présentés dans le tableau 5.9.

Tableau.5.9. Besoins en climatisation pour assurer un confort amélioré

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Déc	Total (kWh)
Salle souterraine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salle au-dessus du sol	0	0	1071,5	1763,2	1957,6	2275,6	2780,5	2581,4	1756,8	845,6	0	0	15032,1

5.7.2. Coût annuel de l'énergie de refroidissement

La consommation énergétique de refroidissement de la salle au-dessus du sol est d'environ 15 032,10 kWh/an. Par conséquent, les prix totaux de la facture d'énergie électrique calculés selon la tarification progressive de l'électricité en Algérie sont donnés dans le tableau 5.10 suivant :

Tableau.5.10. Besoins en climatisation, les factures correspondantes et la subvention de l'état

Mois	Besoins en climatisation (kWh)	Factures (DZD)		Subvention de l'état En %
		Réelle	CREG ²	
Janvier	0	0		
Février	0	0	5 396.36	52.22
Mars	1 071.50	11 293.61		
Avril	1 763.20	18 584.13		
Mai	1 957.59	20 632.98	37 242.08	41.07
Juin	2 275.60	23 984.82		
Juillet	2 780.45	29 305.96		
Août	2 581.40	27 207.96	44 560.05	40.61
Septembre	1 756.80	18 516.67		
Octobre	845.60	8 912.62		
Novembre	0	0	4 075.79	54.27
Décembre	0	0		
Annuel	15 032,14	158 438,76	91 247,31	42,41

² Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz

Chapitre 5 : Refroidissement par la géothermie : Mesure expérimentale et simulation

L'énergie demeure l'un des premiers pourvoyeurs des subventions de l'État. L'Algérie continue à consacrer des montants importants du budget de l'état pour l'énergie. Les dépenses consacrées au soutien de l'état en matière d'énergie dans le secteur du bâtiment dépassent les 42% par rapport au prix réel de kWh annoncé (10.54 DZD/kWh).

5.7.3. Coût d'investissement total

L'évaluation financière de la construction de la salle souterraine a été établie par les services compétents de la Direction de l'Urbanisme, de la Construction et de l'Habitat (DUCH) de la Wilaya d'Ouargla. Le devis estimatif et quantitatif des travaux de construction de la salle souterraine de 21.41 m² de surface s'élève à 403 093,00 DZD (2 890,28 USD) y compris toutes les conditions de bonne exécution.

5.7.4. Temps de retour sur investissement

Le temps de retour sur investissement est le rapport entre le coût initial de la construction du bâtiment souterrain et le coût annuel de l'énergie globale qui est défini par la consommation énergétique annuelle de la salle au-dessus du sol. Cet indicateur sert à déterminer le temps requis (généralement le nombre d'années) pour récupérer l'argent investi dans le projet. Il est également appelé délai de récupération (SPIB, 2018). Il est calculé comme suit :

$$RSI = \frac{C_{INV}}{EE} \quad (5.3)$$

Avec :

C_{INV} : Coût d'investissement

EE : Économie d'énergie

Les paramètres nécessaires pour calculer le RSI sont les suivants :

- Le coût d'investissement total : 403 093,00 DZD.
- Coût annuel de l'énergie globale : 91 247,31 DZD/an.

Le temps de retour sur l'investissement (RSI) calculé à partir de l'équation (5.3) est d'environ 4 ans. On constate que la construction souterraine nécessite un investissement important au tout début, mais elle nous permet de réduire considérablement la consommation d'énergie.

La figure 5.33 représente le coût énergétique global (Besoins énergétiques) avec le temps de retour sur l'investissement, nous constatons que le coût énergétique global de la salle au-dessus du sol est croissant chaque année (croissance linéaire), et que la rentabilité aussi s'en voit franchement augmentée. L'investissement est en phase avec le temps de retour, grâce aux économies d'énergie.

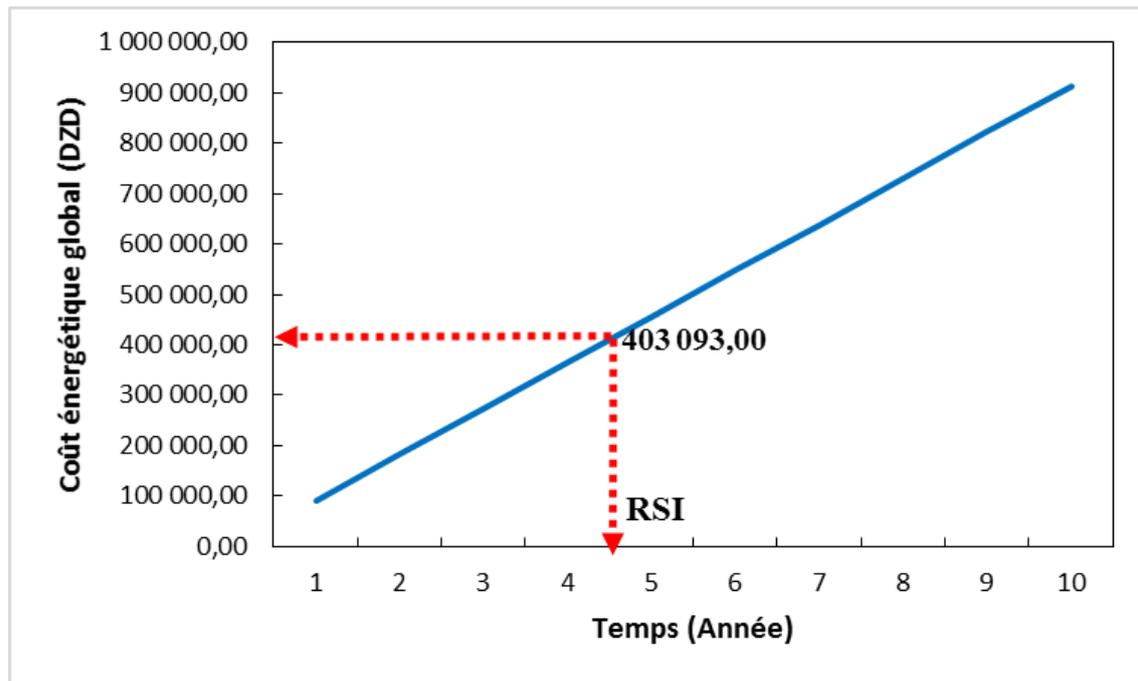


Fig.5.33. Coût d'investissement total avec le temps de retour sur investissement

Par conséquent, on peut conclure que, cette réduction permet la récupération de l'argent investi dans la construction et un gain considérable pour le citoyen, en particulier et l'état en général ce qui encourage à l'investissement. Elle permet aussi la réduction des gaz à effet de serre et ainsi que la sauvegarde de l'environnement.

5.8. Conclusion

Les mesures in situ ont indiqué que les maisons souterraines offrent un environnement plus confortable dans cette région chaude et aride tout au long de l'année.

La simulation thermique permet d'optimiser les performances thermiques, d'analyser les paramètres physiques dans une période spécifique, et de prendre en compte l'évolution des conditions extérieures sévères, le but primordial étant d'assurer le confort thermique.

Pour notre cas, nous avons opté pour Google SketchUp pour la conception 3D de l'habitat et TRNSYS 18 comme outil de simulation thermique. La simulation nous a permis de voir et d'étudier le comportement thermique d'un habitat souterrain soumis aux conditions climatiques sahariennes.

Malgré le coût élevé au tout début de l'investissement dans les maisons souterraines. Cependant, une économie d'énergie importante peut être assurée le long de l'année, ce qui conduit à une efficacité énergétique, une rationalisation d'utilisation d'énergie et un impact environnemental presque négligeable.

Conclusion générale et perspectives

Dans sa volonté d'améliorer son confort, l'homme d'aujourd'hui comme d'hier cherche sans cesse à mieux comprendre le comportement des facteurs climatiques qui l'entourent. La maîtrise du climat nécessite une bonne compréhension de l'interaction entre l'homme et l'environnement.

Adapter la conception architecturale à chaque climat apporte des réponses ingénieuses dans n'importe quel environnement en créant une symbiose parfaite entre l'environnement et le bâtiment. Construire avec le climat nécessite l'utilisation de stratégies passives pour modifier le climat intérieur en favorisant un environnement confortable et cela offre un meilleur confort thermique. Dans un climat saharien, le confort thermique estival repose sur la stratégie du froid, car l'effet de la température (qui est trop élevée) est à l'origine de l'inconfort durant cette période.

La construction souterraine qui a été la plus ancienne forme d'abri connue de l'homme qui pourrait être retracée à des époques anciennes, mais aujourd'hui, elle est méconnue du grand public, elle est aussi l'un des stratégies bioclimatiques pour conserver un l'environnement naturel ainsi que de protéger contre la pollution et économiser la consommation d'énergie autant que possible.

Dans ce travail, nous avons examiné les bâtiments souterrains à partir d'aspects préliminaires tels que le contexte historique, la classification et les critères de performance énergétique thermique ultérieurs, et nous avons essayé d'élaborer les variables de performance thermique et de mener une étude plus approfondie des avantages et des inconvénients de cette technique de refroidissement passif vers différentes perspectives de développement durable. Avec l'intention de gagner une large acceptation dans la société moderne, cette thèse a proposé une conception conceptuelle de la maison souterraine, qui jette les bases des études plus approfondies de la durabilité de cette technique d'enveloppe de bâtiment.

Dans la première partie de l'étude expérimentale, des mesures expérimentales du profil vertical de la température du sol sur le site d'Ouargla en mois d'août 2020 ont été menés. Le profil vertical de la température du sol est mesuré à partir de la surface de la terre ($Z=0$) jusqu'à 2 m de profondeur avec un pas de 50 cm. Les mesures ont été effectuées chaque minute. Nous avons constaté qu'à une profondeur d'environ 2 m de la surface du sol la température avait une valeur constante d'environ 30 °C pendant toute la journée.

Conclusion générale et perspectives

La température dans le sol, jusqu'à 5 m de profondeur qui a été simulée à partir du modèle de Kusuda pour une durée d'une année et pour les trois types du sol : argileux, sablo-argileux et sableux. Les diffusivités thermiques ont été prises en compte. Les mêmes graphiques sinusoïdaux ont été obtenus et au voisinage de la profondeur 5 m la température se stabilise autour de 26°C. Ces températures sont comparées aux valeurs mesurées auparavant. Cette comparaison montre un bon accord entre la température du sol calculée et mesurée d'environ 0,5 °C pour une profondeur inférieure à 1,5 mètre.

Les résultats obtenus servent comme base de données aux chercheurs et concepteurs désirent d'étudier le potentiel d'utilisation du sol en tant que dissipateur ou source de chaleur pour de multiples activités.

La deuxième partie de l'étude expérimentale consiste à valoriser les potentiels que représentent les bâtiments souterrains par rapport aux bâtiments au-dessus du sol dans le sud de l'Algérie. L'étude expérimentale a été faite durant 4 jours au mois d'août (du 20 au 23 août 2020). L'évolution de la température intérieure et l'humidité relative de la salle souterraine mesurées par les capteurs installés à l'intérieur varient entre 28-29 °C et 20-30% respectivement.

Il existe plusieurs outils de simulation thermique utilisés pour étudier les bâtiments, dont le programme sur lequel nous nous sommes appuyés dans notre étude. Notre choix pour TRNSYS 18 comme outil de simulation repose sur plusieurs raisons : D'abord TRNSYS n'est pas un logiciel dédié uniquement à l'étude du comportement thermique du bâtiment, il est plutôt un solveur de systèmes d'équations, capable de réaliser des simulations dynamiques. Il est basé sur une approche modulaire et permet de créer de nouveaux modèles et d'y intégrer en plus ceux de la bibliothèque. On a effectué une simulation thermique dynamique avec le logiciel TRNSYS 18 via un modèle TRNSYS3D conçu sous Google SketchUp d'une salle souterraine dans des conditions climatiques réelles de la ville d'Ouargla, nous avons constaté :

- La température à l'intérieure de la salle souterraine est relativement constante et située entre 28 et 29 °C.
- L'orientation d'une habitation souterraine n'influe pas considérablement sur la température intérieure.
- La salle souterraine peut être considérée comme une demande de refroidissement nulle, alors que la demande de refroidissement de la salle au-dessus du sol est considérable autour de 2780.5 kWh en mois de juillet seulement soit d'environ 95% de la demande globale.

Conclusion générale et perspectives

L'étude économique a conclu que le prix de la facture d'énergie de refroidissement est de 91 247,31 DZD/an (654,27 USD/an), le coût de construction du bâtiment souterrain est de 403 093,00 DZD (2 890,28 USD) et le temps de retour sur investissement (RSI) est d'environ 4 ans. Une économie d'énergie importante peut être assurée par l'investissement dans ce type de construction souterraine ce qui conduit à une efficacité énergétique, une rationalisation d'utilisation d'énergie et un impact environnemental presque négligeable.

Seulement ces maisons souterraines demandent un coût plus important lors de la réalisation. De plus, dans le temps, ces bâtiments auront besoin de moins d'énergie pour chauffer, refroidir, ... etc., ce qui représente des économies par rapport à d'autres bâtiments au-dessus du sol. Ces résultats incitent les citoyens des régions chaudes comme le Sud Algérien de prendre en considération la construction souterraine dans futurs projets d'habitation.

En définitive, ce modeste travail ouvre la voie à d'autres études plus approfondies dans l'efficacité énergétique des bâtiments dans les régions chaudes et arides, en tenant compte des recommandations suivantes :

- Réduire le taux d'hygrométrie en améliorant la ventilation naturelle dans le bâtiment.
- Un projet de nouveau bâtiment est l'occasion idéale de mettre l'accent, dès le départ, sur la construction souterraine.
- Utiliser des matériaux de construction locaux pour donner un autre gain économique.
- L'intégration d'un panneau solaire photovoltaïque peut réduire considérablement la facture d'électricité.

Pour les recherches futures, le modèle du bâtiment souterrain étudié offre des possibilités d'extension en profondeur. Un nouveau concept de la construction souterraine peut être étudié.

Les objectifs de ce genre d'étude sont également basés sur l'économie d'énergie, le confort de l'habitant et la diminution de l'impact environnemental.

Nous souhaitons enfin que ce modèle puisse être expérimenté comme alternative à la typologie de construction future dans les régions arides chaudes.

Références bibliographiques

- Abdou, S., & Boumaza, M.** (2004). Investigation sur l'intégration climatique dans la maison traditionnelle du ksar de ouargla. *Sciences & Technologie B*, 21, 121–129.
- Abel, E.** (1994). Low-energy buildings. *Energy and Buildings*, 21(3), 169–174. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)90032-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)90032-9)
- ACPP.** (2021). *Association canadienne des producteurs pétroliers (ACPP)*. <https://www.capp.ca/fr/energie/besoins-energetiques-mondiaux/>. Site consulté le 16/09/2021
- Ahriz, A., Mesloub, A., Elkhayat, K., Alghaseb, M. A., Abdelhafez, M. H., & Ghosh, A.** (2021). Development of a mosque design for a hot, dry climate based on a holistic bioclimatic vision. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13116254>
- Akyildiz, N. A.** (2021). *Value In Sustainable Development: Analysis Of Traditional Safranbolu Town The Importance Of Vernacular Architecture With Tangible Cultural Heritage Value In Sustainable Development: Analysis Of Traditional Safranbolu Town. November 2020.*
- Al-Ajmi, F., Loveday, D. L., & Hanby, V. I.** (2006). The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment*, 41(3), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>
- Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R., & Mayer, H.** (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 28(3), 243–256. <https://doi.org/10.3354/cr028243>
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., & Ervina Efzan, M. N.** (2016). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 60, pp. 692–713). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>
- Alkama, D., & Sebti, M.** (2012). Microclimatic Effects of Habitat Reconstruction in Ksour. *International Conference on Environmental, Biomedical and Biotechnology.*
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y.** (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139>
- Alonso, L., & Renard, F.** (2020). Compréhension du microclimat urbain lyonnais par

Références bibliographiques

- l'intégration de prédicteurs complémentaires à différentes échelles dans des modèles de régression. *Climatologie*, 17(2), 1–24.
- Alwetaishi, M., Benjeddou, O., Balabel, A., & Alzaed, A.** (2021). Can underground buildings be beneficial in hot regions? An investigation of field measurements in on-site built underground construction. *Buildings*, 11(8).
<https://doi.org/10.3390/buildings11080341>
- AMEE.** (2021). *Efficacité énergétique dans le bâtiment*. <https://www.amee.ma/>. Site consulté le 10/07/2021
- ANME.** (2021). *Bâtiment*. <http://www.anme.tn/?q=fr/content/batiment-0>. Site consulté le 10/07/2021
- AP-10.** (2021). *Les solutions alternatives : Bâtiments Basse Consommation Label BBC – Effinergie*. www.effinergie.org. Site consulté le 10/07/2021
- APRUE.** (2021). *Programme ECO-BAT*. <http://www.aprue.org.dz/>. Site consulté le 10/07/2021
- Aruga, K., Islam, M. M., & Jannat, A.** (2020). Effects of COVID-19 on Indian energy consumption. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/su12145616>
- ASHRAE.** (2002). *Guideline14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*.
- ASHRAE.** (2017). *Handbook of Fundamentals Chapter 09: Thermal comfort. 1.*
- Asim, M., Dewsbury, J., & Kanan, S.** (2016). TRNSYS simulation of a solar cooling system for the hot climate of Pakistan. *Energy Procedia*, 91, 702–706.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.233>
- Attia, S., & Carlucci, S.** (2015). Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, 102, 117–128.
- Audi, Y.** (2016). *Développement d'une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Bakoosh, H. M.** (2019). *Comparison between vernacular architecture (underground house) and modern housing in Gharyab, Libya*. PhD Thesis, Near East University Nicosia.
- Batier, C.** (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier - France.
- Battaglia, J.-L., Kusiak, A., & Jean-Rodolphe, P.** (2014). *Introduction aux transferts thermiques ; cours et exercices corrigés (2e édition)* (Dunod Science).
- Bekkouche, S. M. E. A., Benouaz, T., & Cheknane, A.** (2009). A modelling approach of

Références bibliographiques

- thermal insulation applied to a saharan building. *Thermal Science*, 13(4), 233–244.
<https://doi.org/10.2298/TSCI0904233B>
- Belgherras, S., Bekkouche, S. M. A., benouaz, T., & Benamrane, N.** (2017). Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions. *Energy and Buildings*, 145, 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.030>
- Bencheikh, H., & Rchid, A.** (2012). The effects of green spaces (palme trees) on the microclimate in arides zones, case study: Ghardaia , Algeria. *Energy Procedia*, 18(September), 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.013>
- Benhammou, M., & Draoui, B.** (2011). Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d’Adrar-Effet de la nature du sol. In *Revue des Energies Renouvelables* (Vol. 14).
- Benhammou, M., Draoui, B., Zerrouki, M., & Marif, Y.** (2015). Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy Conversion and Management*, 91, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042>
- Benhamou, M.** (2015). *Analyse et caractérisation d’un système géothermique de rafraichissement approprié aux logements bâtis au sud algérien*. Thèse de doctorat, Université Tahri Mohamed Béchar.
- Benslimane, N., Biara, R. W., & Bougdah, H.** (2020). Traditional versus contemporary dwellings in a desert environment: The case of Bechar, Algeria. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(4), 118–130.
<https://doi.org/10.5755/j01.arem.76.4.21595>
- Benyoucef, Y. M., & Dionisovich, A. R.** (2013). Architectural Mutations of Individual Houses in the Sahara Desert : Case of Algerian Sahara. *Proceedings of a Conference at University of Russia*, 61–70.
- Benzaama, M. H.** (2017). *Étude du confort thermique dans l’habitat par des procédés géohéliothermiques*. Thèse doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France.
- Berghout, B., Forgues, D., & Monfet, D.** (2014). Simulation du confort thermique intérieur pour l’orientation d ’ un bâtiment collectif à Biskra, Algérie. *ESim 2014*.
- Beverly, J.** (2012). *10 Amazing Underground Homes*. ODDEE.
https://www.oddee.com/item_98085.aspx. Site consulté le 25/08/2021
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J.** (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy &*

Références bibliographiques

- Buildings*, 198, 467–490.
- Bobylev, N.** (2009). Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use. *Land Use Policy*, 26(4), 1128–1137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.02.003>
- Bornarel, A.** (2014). *Confort d'été passif* (des guides).
- Bouchair, A., Tebbouche, H., Hammouni, A., Lehtihet, M. C., & Blibli, M.** (2013). Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria. *Energy Procedia*, 42, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.050>
- Broere, W.** (2016). Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 245–248. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.012>
- Cadiergues, R.** (2015). La performance énergétique. *MémoCad NB10.A*, 1–6.
- CEREFÉ.** (2020). *Transition Énergétique en Algérie*.
- Certivéa, I. b.** (2021). *Certivéa*. <https://www.certivea.fr/>. Site consulté le 14/08/2021
- Chow, T. T., Long, H., Mok, H. Y., & Li, K. W.** (2011). Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. *Energy and Buildings*, 43(12), 3568–3575. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.026>
- Climate-Data.org.** (2021). *Climat Ouargla: Pluviométrie et Température moyenne Ouargla, diagramme ombrothermique pour Ouargla - Climate-Data.org*. fr.climate-data.org. Site consulté le 22/08/2021
- Coccolo, S.** (2017). *Bioclimatic Design of Sustainable Campuses using Advanced Optimisation Methods*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- D'Agostino, D., & Mazzarella, L.** (2019). What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *Journal of Building Engineering*, 21, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.019>
- Djeradi, M. A.** (2013). L'architecture ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants. *L'architecture Vernaculaire*, 37.
- DPEB.** (2021). *La performance énergétique des bâtiments*. <https://eur-lex.europa.eu/>. Site consulté le 14/07/2021
- Dronkelaar, Chris Van, & Physics, B.** (2013). *Department of the Built Environment Master's thesis Underground buildings. February*.
- DTRC3-2.** (1997). *Thermal regulation of residential buildings calculating methods for determining building heat losses*. www.cnerib.edu.dz

Références bibliographiques

- Écolabels, G. d.** (2021a). *Vedura*. <http://www.vedura.fr/guide/ecolabel/leed>. Site consulté le 14/08/2021
- Écolabels, G. d.** (2021b). *Vedura*. <http://www.vedura.fr/guide/ecolabel/breeam>. Site consulté le 14/08/2021
- Elwerfalli, M.** (2016). *Contemporary Courtyard Houses of Libya: New Directions in Sustainable Housing Development*. 1–341.
- Energie+.** (2021). *Conductivité thermique d'un matériau*. <https://energieplus-lesite.be/>. Site consulté le 19/08/2021
- Energguide.be.** (2021). *Comment calculer la consommation d'un appareil électrique?* <https://www.energguide.be/fr/questions-reponses/comment-calculer-la-consommation-dun-appareil-electrique/94/>. Site consulté le 15/08/2021
- Environnement.** (2020). *Guide Bâtiment Durable*. <https://www.guidibatimentdurable.brussels/fr/>. Site consulté le 14/07/2021
- Environnement, B. d'études.** (2021). *CAP TERRE*. <https://www.cap-terre.com/>
- eRT2012.** (2021). *Guide RT2012*. <http://www.e-rt2012.fr>. Site consulté le 18/07/2021
- Fanger, P.** (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering* (Danish Tec).
- Fezzioui, N., Draoui, B., Ait-Mokhtar, A., & Larbi, S.** (2008). Strategy of bioclimatic architecture in Ksar of Kenadza. *The Third Architecture and Sustainability Conference in Biskra Strategies and Perspectives, April*.
- Geetha, N. B., & Velraj, R.** (2012). Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage-A review. In *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* (Vol. 29, Issue 2).
- Givoni, B.** (1978). *L'homme, l'architecture et le climat* (Éditions du "Moniteur"), Paris.
- Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J.** (2012). *Chapter 10 - Civic facilities underground bt - underground infrastructures*. 199–211. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123971685000109>
- Guedes, M. C.** (2013). Sustainable Architecture in Africa. In *Sustainability, Energy and Architecture* (pp. 421–503).
- Guedouh, M. S., Zemmouri, N., & Assassi, A.** (2021). Underground Building's Geothermal Potential: an Alternative Passive Sustainable Construction Facing Hot-Arid Climates. Case of historical NLA Hospital in Bitam. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 1889–1896.
- Gueliane, N.** (2018). *Performances énergétiques du patrimoine architectural mozabite*.

January.

- Guilloux, A.** (2016). Design of geotechnical structures: contribution of observation and modelling. *Rev. Fr. Geotech.*, 146(1), 1–9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/geotech/2016001>
- Guyot, D.** (2020). *Evaluation sur modèle de simulation thermique dynamique calibré des performances d'un contrôleur prédictif basé sur l'utilisation de réseaux de neurones*. Thèse de Doctorat, HESAM Université.
- Hadagha, F., Bada, Y., & Petrisor, A.** (2017). Energy efficiency and multiple roles of patio in oasis house in Biskra (Algeria). *Revista Şcolii Doctorale de Urbanism*, 2(1), 29–36.
- Hamdani, M.** (2016). *Choix de l'Orientation et des Matériaux de Construction en Vue d'Améliorer les Performances Thermiques des Bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
- Hamdani, M., Bekkouche, S. M. E. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., Benamrane, N., & Benkhelifa, R. D. A.** (2018). Etude de l' Effet de la Ventilation Naturelle Transversale sur un Bâtiment Semi-Collectif dans la Région de Ghardaïa. *The 5th International Seminar on New and Renewable Energies*, 1–5.
- Hamida, B.** (2007). *Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et arides*. Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine.
- Hastings, S. R.** (2004). Breaking the “heating barrier”. Learning from the first houses without conventional heating. *Energy and Buildings*, 36(4), 373–380.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.027>
- Hebbal, B., Marif, Y., Kaddour, A., Belhadj, M. M., & Azizi, A.** (2021). Bioclimatic approach of passive cooling techniques for the design of buildings in southern Algeria. *International Journal of Energetica*, 6(1), 13–18.
- Hebbal, Belkhir, Marif, Y., & Belhadj, M. M.** (2020). Bioclimatic Architecture in the Ancient Village of Southern Algeria. *Springer Nature*, 597–603.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-5444-5_74
- Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A.** (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy*, 92, 606–627.
- IBGE, B.** (2007). Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments : construire un bâtiment compact. *Infos Fiches Eco-Construction*, 1–4.
- IEA.** (2020). *COVID-19 Impact on Electricity*. <https://www.iea.org/reports/covid-19->

Références bibliographiques

impact-on-electricity. Site consulté le 17/07/2021

- Imessad, K., Kharchi, R., Bouchaib, S., Chenak, A., Hakem, S., Hamidat, A., Larbiyoucef, S., Sami, S., & Sahnoune, F.** (2017). Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. *Revue Des Energies Renouvelables*, 20(4), 591–597.
- IRENA.** (2021). *Renewable capacity statistics 2020*.
- Kadraoui, H.** (2019). *Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore*. Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen.
- Kadri, M., & Bouchair, A.** (2020). The Impact of the Roof on Indoor Thermal Comfort in Traditional Cities. Case of Béni Isguen's Ksar. *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, 4(3), 77–87.
- Kamal, M. A.** (2012). An overview of passive cooling techniques in buildings: Design concepts and architectural interventions. In *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* (Vol. 55, Issue 1).
- Khabbaz, M., Benhamou, B., Limam, K., Hollmuller, P., Hamdi, H., & Bennouna, A.** (2016). Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. *Energy & Buildings*, 125(1), 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.071>
- Khanal, R., & Lei, C.** (2011). Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation. In *Energy and Buildings* (Vol. 43, Issue 8, pp. 1811–1819). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035>
- Khoukhi, M., & Fezzioui, N.** (2012). Thermal comfort design of traditional houses in hot dry region of Algeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-3-5>
- Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., & Zeraoui, Y.** (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120(PART A), 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>
- Kusuda, T., Piet, O., & Bean, J. W.** (1983). Annual Variation of Temperature Field and Heat Transfer Under Heated Ground Surfaces (Slab-on-Grade Floor Heat Loss Calculation). *National Bureau of Standards, Building Science Series, 1*.
- Labbé, M.** (2016). Architecture of underground spaces: From isolated innovations to connected urbanism. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 153–175. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.004>

Références bibliographiques

- Labs, K.** (1976). The architectural underground. *Underground Space*, 1(2), 135–156.
- Latreche, S., & Sriti, L.** (2018). Optimisation énergétique d'un bâtiment résidentiel autoproduite à Biskra à travers ses caractéristiques matérielles. *Revue Des Energies Renouvelables*, 21(3), 433–443.
- Lavigne, P.** (1998). *Architecture climatique - une contribution au développement durable. Tome 2 - Concepts et dispositifs* (Edisud).
- Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marengo, L.** (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>
- Makhloufi, F. Z., Hadj Mohamed, N., & Hamouinne, A.** (2021). Intervention on Ksourien Inheritance: Between Planning and Autoconservation. Example Ksar of Kenadsa, Bechar, Algeria. *International Journal Of Conservation Science*, 12(1), 51–66.
- Markov, D.** (2002). *Practical evaluation of the thermal comfort parameters*. <https://www.researchgate.net/publication/305755583>
- Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A.** (2011). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. ., & Asimakopoulos, D. .** (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3–4), 181–190. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00012-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00012-1)
- Milanović, A. R., Folić, N. K., & Folić, R.** (2018). Earth-sheltered house: A Case Study of Dobraca Village House near Kragujevac, Serbia. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103629>
- Ministère de l'Énergie et Mines.** (2020). *Bilan Énergétique National Année 2019*. <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>. Site consulté le 11/07/2021
- Moniteur, L.** (2011). *Le Moniteur*. <https://www.lemoniteur.fr/article/ventilation-puits-canadien.679004>. Site consulté le 16/08/2021
- Morland, F., & Higgs, F.** (1978). Earth covered buildings. *Proceedings of a Conference in*

Références bibliographiques

Forth Worth,.

Moujalled, B. (2007). *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*. 329.

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modélisation+dynamique+du+confort+thermique+dans+les+bâtiments+naturellement+ventilés#0>

Mukhtar, A., Ng, K. C., & Yusoff, M. Z. (2018). Design optimization for ventilation shafts of naturally-ventilated underground shelters for improvement of ventilation rate and thermal comfort. *Renewable Energy*, 115, 183–198.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.051>

Munaretto, F. (2014). *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Technologies, ParisTech.

Naima, B., Kouider, C., & Babali, B. (2021). Apport à la connaissance cartographique du peuplement à *Quercus faginea* subsp. *tlemcenensis* de la réserve de Moutas (Tlemcen-Algérie nord occidentale). *Acta Botanica Malacitana*, 46(January).

<https://doi.org/10.24310/abm.v46i.10221>

Nang, E. E. K., Abuduxike, G., Posadzki, P., Divakar, U., Visvalingam, N., Nazeha, N., & Car, J. (2019). Review of the potential health effects of light and environmental exposures in underground workplaces. *Tunn. Undergr. Space Technol*, 84, 201–209.

Nasreddine, S., Belkacem, D., & Younes, M. (2019). Experimental study of earth to air heat exchanger performance in arid regions. First step: In-situ measurement of ground vertical temperature profile for different depths. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 56(2), 183–194.

NOEL, P. (2018). *Évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température de consigne des thermostats en mode chauffage à l'aide de données mesurées in situ et de simulations par TRNSYS 16*.

Ogunsote, O. O., & Prucnal-Ogunsote, B. (2002). Comfort Limits for the Effective Temperature Index in the Tropics: A Nigerian Case Study. *Architectural Science Review*, 45(2), 125–132.

Olgay, V. (1963). Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism: New and expanded edition. In *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: New and Expanded Edition* (pp. 1–190).

OMM. (2014). *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (Organisation Météorologique Mondiale, OMM Genève, Suisse).

Références bibliographiques

- Ony.** (2012). *onypense*. <http://www.onypense.com/articles/view/ventilation-naturelle>. Site consulté le 10/07/2021
- Ouali, S., & Baddari, A. K. K.** (2006). Etude géothermique du Sud de l'Algérie. *Revue Des Energies Renouvelables*, 9(4), 297–306.
- Ouali, Salima.** (2019). Chauffage et rafraîchissement par la géothermie. *Division Thermique et Thermodynamique Solaire et Géothermie*, 2–5.
- PB.** (2021). *BP Statistical Review of World Energy 2020 : les chiffres clés de l'énergie dans le monde*. <https://www.connaissancedesenergies.org>. Site consulté le 13/08/2021
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C.** (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Poduval, N.** (2014). *The BCA Green Mark Scheme A Driver for Energy-Efficiency Labelling in Singapore*.
- Porras-Amores, C., Mazarrón, F. R., Cañas, I., & Villoría Sáez, P.** (2019). Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90(April), 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.023>
- Prelvukaj, Z., Beqiri, L., Jashari, R., & Spahiu, F.** (2018). *Underground house as a new concept of housing*. <https://knowledgecenter.ubt-uni.net/conferencehttps://knowledgecenter.ubt-uni.net/conference/2018/all-events/29>
- Qihu, Q.** (2016). Present state, problems and development trends of urban underground space in China. *Tunn. Undergr. Space Technol*, 55, 280–289.
- Rahmouni, S.** (2020). *Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique*. Thèse de doctorat, Université Mostepha Ben Boulaid- Batna 2.
- Russell, H.** (2007). Votre nouvelle maison souterraine. In *Une espèce en danger*.
- Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y.** (2012). Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477–1495.
- Sahebzadeh, S., Heidari, A., Kamelnia, H., & Baghbani, A.** (2017). Sustainability features of Iran's vernacular architecture: A comparative study between the architecture of hot-arid and hot-arid-windy regions. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/su9050749>
- Saifi, N.** (2016). Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.

Références bibliographiques

- SCL.** (2018). Trnsys 18. In *Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison* (Vol. 3). <http://www.trnsys.com/> Site consulté le 10/09/2021.
- Sebti, M., Alkama, D., & Bouchair, A.** (2013). Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement “Ksar” of Ouargla in southern Algeria. *Frontiers of Architectural Research*, 2(3), 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.05.002>
- Sedira, S., & Mazouz, S.** (2018). Experimental case study on the effect of the urban morphology on urban microclimate and outdoor thermal comfort. *Journal of Building Materials and Structures*, 5, 157–163.
- Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M. K., & Attia, S.** (2019). Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*, 161(May), 106271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106271>
- Shan, M., Hwang, B. G., & Wong, K. S. N.** (2017). A preliminary investigation of underground residential buildings: Advantages, disadvantages, and critical risks. *Tunn. Undergr. Space Technol*, 70, 19–29.
- Shi, L., Zhang, H., Li, Z., Luo, Z., & Liu, J.** (2018). Optimizing the thermal performance of building envelopes for energy saving in underground office buildings in various climates of China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77(66), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.019>
- Simona, P. L., Spiru, P., & Ion, I. V.** (2017). Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation. *Energy Procedia*, 128, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.044>
- Sobhy, I.** (2017). *Modélisation dynamique d'un bâtiment résidentiel à Marrakech et propositions pour améliorer ses performances énergétiques*. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech - Maroc.
- Sobti, J., & Singh, S. K.** (2015). Earth-air heat exchanger as a green retrofit for Chandīgarh—a critical review. *Geothermal Energy*, 3(14), 1–9.
- SPIB.** (2018). *Les raisonnements économiques liés à la rénovation énergétique des bâtiments*.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & Van Den Dobbelsteen, A.** (2013). A review into thermal comfort in buildings. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 201–215). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
- Tan, Z, Roberts, A. C., Lee, E. H., Kwok, K. W., Car, J., Soh, C. K., & Christopoulos, G.** (2020). Transitional areas affect perception of workspaces and employee well-

Références bibliographiques

- being: A study of underground and above-ground workspaces. *Build. Environ.*, 179, 106840.
- Tan, Zheng, Roberts, A. C., Christopoulos, G. I., Kwok, K. W., Car, J., Li, X. Z., & Soh, C. K.** (2018). Working in underground spaces: Architectural parameters, perceptions and thermal comfort measurements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71(August 2017), 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.002>
- The Earth Institute, C.** (2020). *New Data Suggest COVID-19 Is Shifting the Burden of Energy*. <https://news.climate.columbia.edu/2020/04/21/covid-19-energy-costs-households/>. Site consulté le 14/08/2021.
- Thellier, F.** (1999). *L'homme et son environnement Thermique. Modélisation*. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Van Dronkelaar, C., Cóstola, D., Mangkuto, R. A., & Hensen, J. L. M.** (2014). Heating and cooling energy demand in underground buildings: Potential for saving in various climates and functions. *Energy and Buildings*, 71(March), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.004>
- Van Hoof, J., Mazej, M., & Hensen, J. L. M.** (2010). Thermal comfort: Research and practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2), 765–788. <https://doi.org/10.2741/3645>
- Wu, Y., Gan, G., Verhoef, A., Vidale, P. L., & Gonzalez, R. G.** (2010). Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2574–2583. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.008>
- Xing, L.** (2014). *Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling*. PhD thesis, Oklahoma State University.
- Yang, T., Derek, J., & Croome, C.** (2012). *Natural Ventilation in Built Environment*. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.
- Yoshida, S., Ooka, R., Mochida, A., Murakami, S., & Tominaga, Y.** (2006). Development of Three Dimensional Plant Canopy Model for Numerical Simulation of Outdoor Thermal Environment. *Conference: 6th International Conference on Urban Climate (ICUC6)*.
- Zuaiter, L.** (2015). *Vernacular Passive Cooling Strategies in Hot-Dry Regions of Middle East and North Africa. Sustainable Residential Buildings in U.A.E.* 57.



ANNEXES

Annexe 1

Variation d'écart des températures moyennes horaires intérieures et extérieures pendant les quatre jours de la période d'étude du 20 au 23/08/2020

$\Delta T = T_{indoor} - T_{outdoor}$					
Heures	Jours				Avis de confort
	20/08/2020	21/08/2020	22/08/2020	23/08/2020	
00h00	-2,79	-4,00	-6,21	-5,81	Satisfait
01h00	-1,96	-5,68	-5,72	-4,35	Satisfait
02h00	-1,18	-3,10	-4,25	-3,71	Satisfait
03h00	-0,42	-1,10	-1,59	-2,44	Satisfait
04h00	0,49	0,12	0,08	-1,81	Satisfait
05h00	0,01	-0,20	-0,05	-1,24	Satisfait
06h00	-1,80	-2,26	-1,19	-2,46	Satisfait
07h00	-5,63	-8,07	-4,17	-5,40	Satisfait
08h00	-11,47	-11,23	-6,88	-8,50	Satisfait
09h00	-14,64	-12,96	-10,24	-11,60	Satisfait
10h00	-16,02	-15,26	-12,33	-12,22	Satisfait
11h00	-16,80	-16,01	-14,17	-12,88	Satisfait
12h00	-17,39	-17,10	-14,99	-13,60	Satisfait
13h00	-17,37	-18,48	-16,09	-14,10	Satisfait
14h00	-17,90	-18,46	-16,11	-14,57	Satisfait
15h00	-17,87	-18,24	-16,04	-14,63	Satisfait
16h00	-17,30	-17,64	-15,25	-14,30	Satisfait
17h00	-16,30	-16,89	-14,15	-13,39	Satisfait
18h00	-13,60	-14,37	-12,54	-12,19	Satisfait
19h00	-10,87	-13,14	-10,87	-10,76	Satisfait
20h00	-9,13	-11,14	-9,43	-9,80	Satisfait
21h00	-7,76	-9,21	-8,55	-8,30	Satisfait
22h00	-5,88	-8,15	-6,82	-6,72	Satisfait
23h00	-4,94	-6,99	-6,03	-5,46	Satisfait

Annexe 2

**Variation d'écart de l'humidité relative moyenne horaire intérieure et extérieure
pendant les quatre jours de la période d'étude du 20 au 23/08/2020**

$\Delta HR = HR_{indoor} - HR_{outdoor}$					
Heures	Jours				Avis de confort
	20/08/2020	21/08/2020	22/08/2020	23/08/2020	
00h00	10,52	11,83	7,18	-1,17	Insatisfait
01h00	10,13	12,18	6,43	-2,61	Insatisfait
02h00	10,50	9,78	4,92	-2,23	Insatisfait
03h00	10,00	9,13	0,65	-2,65	Insatisfait
04h00	9,41	9,48	2,26	-4,21	Satisfait
05h00	10,37	8,36	2,62	-6,56	Satisfait
06h00	10,30	8,87	-0,54	-5,73	Satisfait
07h00	11,51	9,55	-0,51	-1,49	Satisfait
08h00	13,11	9,86	-0,62	1,92	Satisfait
09h00	12,77	8,57	1,81	5,23	Satisfait
10h00	11,52	9,28	2,03	6,54	Satisfait
11h00	11,37	9,87	2,34	6,35	Satisfait
12h00	9,40	9,40	3,12	4,28	Satisfait
13h00	9,40	8,46	3,23	3,54	Satisfait
14h00	10,27	9,32	4,07	3,18	Satisfait
15h00	10,40	9,40	4,51	4,40	Satisfait
16h00	10,40	10,40	5,44	3,99	Satisfait
17h00	10,98	10,40	3,79	4,39	Satisfait
18h00	11,40	10,23	2,30	4,55	Satisfait
19h00	11,85	10,40	-0,04	3,18	Satisfait
20h00	12,43	9,20	-2,07	3,62	Satisfait
21h00	11,94	8,85	-2,46	3,02	Insatisfait
22h00	12,35	8,24	-2,76	1,31	Insatisfait
23h00	12,41	7,87	-2,81	1,05	Insatisfait

Production scientifique

B. Hebbal, Y. Marif, M. Hamdani, M.M. Belhadj, H. Bouguettaia, D. Bechki, "The geothermal potential of underground buildings in hot climates: Case of Southern Algeria", Case Studies in Thermal Engineering, 28(2021), 101422.



Belkhir Hebbal, Yacine Marif, Abdelmadjid Kaddour, Mohamed Mustapha Belhadj, Abdelghani Azzizi, "Bioclimatic approach of passive cooling techniques for the design of buildings in southern Algeria", International Journal of Energetica (IJECA) 6(2021), 13-18.



B. Hebbal, Y. Marif, M.M. Belhadj, Y. Chiba, M. Zerrouki, "Thermal Comfort in Southern Algeria: Some Useful Investigation and Case Study", Chapter in M.Hatti (Ed.): ICAIRES2019, Springer Nature Switzerland AG2020

Thermal Comfort in Southern Algeria: Some Useful Investigation and Case Study

B. Hebbal, Y. Marif, M. M. Belhadj, Y. Chiba, M. Zerrouki

- 1 Faculty of Mathematics and Basic Sciences, LENZILA Laboratory, University of Algiers, Algiers, Algeria
2 Faculty of Technology, University of Algiers, Algiers, Algeria
3 Faculty of Applied Sciences, University of Algiers, Algiers, Algeria

Abstract: This paper aims to discuss some studies that have proposed in order to create an acceptable thermal comfort and improve people's quality of life in the residential sector in the southern region of Algeria. The climatic conditions of Algiers were studied in relation with the Algerian National Standard (ANS) in the field of thermal comfort. The results showed that the average temperature of the air was 26 °C, the average relative humidity was 65%, and the average wind speed was 1.2 m/s.

Keywords: Algiers south; Passive cooling; Simulation; Experimental

1 Introduction
The Algerian south is a desert climate with vast area, summer season characterized by high global solar radiation intensity with a maximum of 1000 Wh/m² and very high air temperature, exceeding 45 °C. A review of ancient architecture in the south of Algeria revealed that the ancient technologies have been used for several years. For example, buildings in the historic villages of Ksar or Kasar were erected adjacent to each other in order to reduce the surface exposed to the sun with concrete external walls, inner courtyard and small windows. Furthermore, the Kasar were surrounded by the main areas in order to take the advantage of the freshness of this point. By use of these technologies, people were able to live in comfort without any artificial air conditioning.

Nowadays, new materials have been introduced in construction without a proper study of their suitability for the climate in hot regions. This has resulted in excessive recovery to conventional air conditioning to guarantee human comfort. It is estimated that about 60% of the total building power consumption is consumed by air conditioning equipment [1]. According to Ghaddar et al. [2] study, the energy consumption can be increased to 150-76 TWh in 2010 in Algeria. The energy efficient housing standard is rapidly spreading across world, it becomes necessary for Algeria to adapt this standard for facing the important increase in the electricity consumption.

© Springer Nature Switzerland AG 2020
M. Hatti (Ed.): ICAIRES 2019, LNCS, vol. 121, pp. 278-283, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-51111-2_28

B. Hebbal, Y. Marif, M. M. Belhadj, "Bioclimatic architecture in the ancient villages of southern Algeria", ICREE2019, Springer Proceedings in Energy, (2020) Springer Nature Singapore Pte Ltd.

Chapter 74 Bioclimatic Architecture in the Ancient Village of Southern Algeria

Belkhir Hebbal, Yacine Marif, and Mohamed Mustapha Belhadj

Abstract: South Algeria has a vast area with an arid climate. The climate season is characterized by the high level use of conventional air in the residential sector. The stage of construction in this sector is one of the major concerns expressed in the framework of the Algerian energy consumption model. The bioclimatic house standard is rapidly spreading across the world, it becomes necessary for Algeria to adapt this standard for facing the important increase in electricity consumption. In Algeria, fossil fuels are the largest source of electricity production. The electrical energy produced is used for the production of electricity. However, it has been recognized as an example of adaptation to the desert climate in Algeria. This work presents the bioclimatic architecture that has been used many years ago. The results of the investigation found that the energy consumption can be increased to 150-76 TWh in 2010 in Algeria. The energy efficient housing standard is rapidly spreading across world, it becomes necessary for Algeria to adapt this standard for facing the important increase in the electricity consumption.

Keywords: Southern regions - Ksar - Bioclimatic architecture - Passive cooling techniques

74.1 Introduction

In the last years, energy consumption in Algeria has increased with the rapid growth in the residential sector, especially in southern regions. According to the national agency for promotion and rationalization of energy, energy consumption in the residential sector in Algeria represents 45% of total energy consumption and the use of cooling systems in small regions consumed for more than 60% of the total building power consumption [1]. Furthermore, Ghaddar et al. [2] in their investigation found that the energy consumption can be increased to 150-76 TWh in 2010 in Algeria. The use of renewable energy and energy-efficient housing

B. Hebbal (✉), Y. Marif, M. M. Belhadj, University of Algiers, P.O. Box 711, Belkhir Road, Algiers, Algeria e-mail: hebbal@univ-alger1.dz
© Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020
Belhadj and B. A. Belhadj (Eds.), ICREEC 2019, Springer Proceedings in Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2844-5_74

ملخص

يُصنف جنوب الجزائر على أنه منطقة حارة وجافة حيث يشعر السكان بعدم الراحة الحرارية على نطاق واسع. في هذا المناخ الصحراوي، تعتمد الراحة الحرارية الصيفية على استراتيجية التبريد لأن تأثير درجة الحرارة (المرتفعة جدًا) هو مصدر الانزعاج طوال هذه الفترة. إن البناء تحت الأرض الذي كان أقدم أشكال المأوى المعروفة للإنسان والذي يمكن إرجاعه إلى العصور القديمة، ولكنه اليوم غير معروف عند عامة الناس، لا يزال أحد الاستراتيجيات المناخية الحيوية التي توفر الطاقة قدر الإمكان وتقلل من انبعاثات الغازات الدفيئة من خلال الحفاظ على بيئة طبيعية. الهدف من هذا العمل هو تحسين استهلاك الطاقة في منزل يقع في ورقلة (جنوب / شرق الجزائر). في هذا العمل درسنا البناء تحت الأرض تجريبياً وعددياً. تم إجراء نمذجة غرفة تحت الأرض وتطور درجة حرارة الهواء الداخلي واحتياجات التدفئة والتبريد باستخدام برنامج TRNSYS 18. تم بعد ذلك مقارنة البيانات المأخوذة داخل الغرفة تحت الأرض مع نتائج النمذجة والمحاكاة لنفس الغرفة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن درجة حرارة الهواء والرطوبة النسبية التي تم قياسها خلال الشهر الأكثر سخونة (أوت) بواسطة المحسات المثبتة داخل الغرفة تحت الأرض تتراوح بين 28-29 درجة مئوية و 20-30% على التوالي، حيث يتم ضمان الراحة الحرارية بدون الحاجة إلى طاقة تبريد (لا حاجة لتكييف الهواء). بلغ إجمالي التوفير في تكلفة الكهرباء المستهلكة لجميع أشهر الصيف لمدة سنة واحدة 91247.31 دينار جزائري / سنة (654.27 دولار أمريكي / سنة)، مع فترة استرداد تقديرية بحوالي 4 سنوات. يمكن ضمان توفير كبير في الطاقة من خلال الاستثمار في هذا النوع من التقنيات السلبية التي تؤدي إلى كفاءة الطاقة وترشيد استخدامها وتأثير بيئي لا يكاد يذكر.

الكلمات المفتاحية: المناخ الصحراوي، الراحة الحرارية، البناء تحت الأرض، TRNSYS، التقنيات السلبية، كفاءة الطاقة.

Résumé

Le Sud Algérien classé comme région chaude et aride où l'inconfort thermique est largement ressenti. Dans ce climat saharien, le confort thermique estival repose sur la stratégie de refroidissement, car l'effet de la température (qui est trop élevée) est l'origine de l'inconfort durant toute cette période. La construction souterraine qui a été la plus ancienne forme d'abri connue par l'homme qui pourrait être retracée à des époques anciennes, mais aujourd'hui, elle est méconnue du grand public, reste l'une des stratégies bioclimatiques qui économise de l'énergie autant que possible et réduire les émissions des gaz à effet de serre en conservant un l'environnement naturel. Le but de ce travail est d'optimiser la consommation énergétique dans une maison située à Ouargla (Sud/Est d'Algérie). Dans le présent travail, nous avons étudié la construction souterraine expérimentalement et numériquement. La modélisation de la structure de la salle souterraine et l'évolution de la température de l'air intérieur et les besoins en chauffage et refroidissement ont été effectués à l'aide du logiciel TRNSYS 18. Les données prélevées à l'intérieur de la salle souterraine ont été ensuite confrontées avec les résultats de la modélisation et simulation de ladite salle. Les résultats obtenus montrent que la température de l'air et l'humidité relative mesurées durant le mois le plus chaud (août) par les capteurs installés intérieurs de la salle souterraine varient entre 28-29 °C et 20-30%

respectivement, où le confort thermique est assuré sans besoin d'énergie de refroidissement (Besoin en climatisation nulle). L'économie totale du coût de l'électricité consommée pour tous les mois d'été d'un an a atteint 91 247.31 DZD/an (654.27 USD/an), avec une période de récupération estimée à environ 4 ans. Une économie d'énergie importante peut être assurée par l'investissement dans ce type de techniques passives qui conduit à une efficacité énergétique, une rationalisation d'utilisation d'énergie et un impact environnemental presque négligeable.

Mots clés : Climat saharien, Confort thermique, Construction souterraine, TRNSYS 18, Techniques passives, Efficacité énergétique.

Abstract

Southern Algeria classified as a hot and arid region where thermal discomfort is widely felt. On this Saharan climate, summer thermal comfort is based on the cooling strategy because the effect of temperature (which is too high) is the source of discomfort throughout this period. The underground construction which was the oldest form of shelter known to man, which could be traced back to ancient times, but today it is unknown to the general public, remains one of the bioclimatic strategies that save energy as much as possible and reduce greenhouse gas emissions by conserving a natural environment. This work aims to optimize energy consumption in a house located in Ouargla (South / East of Algeria). In the present work, the underground construction was studied experimentally and numerically. The modelling of the underground room structure of the underground room and the evolution of the temperature of the interior air and the heating and cooling needs were made by means of the software TRNSYS 18. The data taken inside the underground room were then compared with the results of the modelling and simulation of the given room. The results obtained show that the air temperature and relative humidity measured during the hottest month (August) by the sensors installed inside the underground room vary between 28-29°C and 20-30%, respectively, where thermal comfort is ensured without the need for cooling energy (No need for air conditioning). The total saving in cost of the consumed electricity for all summer months of 1 year reached 91 247.31 DZD/year (654.27 USD/year), with an estimated payback period of about 4 years. Significant energy savings can be ensured by investing in this type of passive techniques, which leads to energy efficiency, rationalization of energy use and almost negligible environmental impact.

Keywords: Saharan climate, Thermal comfort, Underground construction, TRNSYS 18, Passive techniques, Energy efficiency.