



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté Des Sciences Appliquées

Département de Génie mécanique

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : thermo-Energétique

Présenté par :

MESSAOUDI Mohammed Tahar

**Conception d'une résidence autonome utilisant la
géothermie et l'énergie solaire dans le sud Algérien**

Soutenu publiquement le :25/11/2021

Devant le jury :

Hamza BOUGUETTAIA	Professeur	Université de Ouargla	Président
Abdelghani BOUBEKRI	Professeur	Université de Ouargla	Examineur
Boubekeur DOKKAR	Professeur	Université de Ouargla	Encadreur
Sidi Mohammed El-Amine BEKKOUCHE	Directeur de recherche	URAER. Ghardaïa	Examineur
Noureddine CHERRAD	Maitre de conférences (A)	Université de Ouargla	Examineur
Nadia SAIFI	Maitre de conférences (A)	Université de Ouargla	Examineur

Année universitaire 2021/2022

Je commence par exprimer ma gratitude envers ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur Boubekour Dokkar. Son écoute attentive et sa disponibilité tout au long de ce parcours, malgré ses nombreuses responsabilités académiques, m'ont été d'une grande aide. Je lui suis profondément reconnaissant pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Monsieur Hamza Boughettaia, Professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma thèse.

Mes remerciements vont également à mes examinateurs : Monsieur Abdelghani Boubekri, Professeur à l'Université de Ouargla, Monsieur Sidi Mohammed El-Amine Bekkouche, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, ainsi que Mlle Nadia Saifi et Monsieur Noureddine Cherrad, Maîtres de Conférences à l'Université de Ouargla. Leur intérêt pour mon travail et leur présence lors de ma soutenance ont été très appréciés.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de cette thèse, en particulier Ibrahim Cherrad et Messaoudi Lazhar, avec qui j'ai partagé des moments enrichissants et qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	a
Listes des Figures	d
Liste des tableaux	h
Nomenclature.....	i
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Etude sociologique : climat et bâtiment traditionnel	4
1. Introduction	4
2. Etude sociologique	4
2.1. Description des bâtis à Ghardaïa.....	4
2.2. Description des bâtis à Ouargla	8
2.3. Description des bâtis à EL Oued.....	11
3. Construction souterraine et semi souterraine.....	17
3.1. Habitations du M'Zab.....	18
3.2. Maison troglodyte à Matmata, Tunisie	18
3.3. Structures souterraines dans la province de Shanxi, au nord de la Chine	19
3.4. Maisons troglodytes souterraines à l'Iran	19
3.5. La ville souterraine de Cappadoce.....	20
4. Climat de la région	21
4.1. Situation géographique de la région.....	21
4.2. Aspect climatique de la région	21
4.3. Model et courbes d'irradiation solaire	23
5. Conclusion.....	25
Chapitre 2 Conception générale du plan de la résidence.....	26
1. Introduction	26
2. La géothermie dans le confort du bâtiment	26
2.1. Géothermie directe (semi-souterrain)	26
2.2. Géothermie indirecte.....	26
3. Présentation de la région d'étude	27
3.1. Situation géographique	27
3.2. Analyse des paramètres climatiques et de la région.....	28
3.3. Plan et structure d'une maison à METLILI	29
4. Choix des plans architecturaux de la résidence	30
4.1. Critères de choix	31
5. Description du local semi-souterrain.....	31
5.1. Rôle du local semi-souterrain	31

5.2. Plan et dimensions	31
6. Description géométrique du premier étage.....	34
6.1. Role et exploitation.....	34
6.2. Plan et dimensionnement	34
6.3. Forme du toit de la maison.....	36
6.4. Epaisseur des murs.....	37
7. Aspect énergétique global	37
7.1. Consommation énergétique en Algerie.....	38
7.2. Consommation d'énergie dans une résidence au sud de l'Algérie.....	38
8. Conclusion.....	39
Chapitre 3 Simulation du comportement thermique du local semi-souterrain.....	40
1. Introduction	40
2. L'outil de simulation ANSYS CFD.....	40
2.1. Brève description	40
2.2. Présentation de la modélisation CFD.....	40
3. Analyse bibliographique.....	41
4. Simulation du local semi-souterrain traditionnel.....	46
4.1. Equations régissantes	46
4.2. Approximation de Boussinesq	48
4.3. Equations régissantes simplifiées.....	48
4.4. Les équations de transfert de la chaleur	49
4.5. Calcul de la température équivalente	51
4.6. Domaine du calcul et hypothèses.....	52
4.7. Simulation numérique	54
4.8. Contours de la température	56
4.9. Contours de vitesse	58
5. Simulation du local semi-souterrain proposé	59
5.1. Forme de conception.....	59
5.2. Conditions aux limites	60
5.3. Détermination des conditions aux limites.....	61
5.4. Premier cas : Ventilation naturelle.....	62
5.5. Deuxième cas : Convection avec ventilateur	66
5.6. Comparaison entre la chambre traditionnelle et les solutions proposées.....	71
6. Conclusion.....	72
Chapitre 4 Intégration des systèmes énergétiques	73
1. Introduction	73
2. Le chauffage solaire	73
2.1. Chauffe-eau solaire	74
2.2. Types d'installations de chauffage solaire.....	75

2.3. Collecteurs photovoltaïque-thermique	76
3. Outil de simulation	78
3.1. METEONORM.....	79
3.2. TRNSYS Studio.....	80
3.3. TRN-Build	80
4. Paramètre du bâtiment.....	81
4.1. Dimensions des zones	81
4.2. Caractéristiques thermiques des matériaux.....	82
4.3. Détails des parois de l'enveloppe de l'habitat étudié.....	83
5. Simulation du bâti.....	85
5.1. La méthodologie de simulation.....	85
5.2. Résultats de la simulation	86
6. Conclusion.....	95
Chapitre 5 Intégration des panneaux solaire.....	96
1. Introduction	96
2. Le système photovoltaïque	96
2.1. L'effet photovoltaïque	96
2.2. Principe de la conversion photovoltaïque	97
2.3. Modélisation d'une cellule solaire	96
2.4. Caractéristique d'un module solaire	98
2.5. Système Photovoltaïque autonome	99
3. La logique floue.....	104
3.1. Principe de la logique floue	104
3.2. Variable linguistique.....	106
3.3. La fonction d'appartenance μ	107
3.4. Les régulateurs flous.....	108
3.5. La commande MPPT à base de la Logique floue	112
4. Résultats des simulations et discussion	113
4.1. Résultats de simulation du système sans régulation	114
4.2. Résultats de simulation du système avec régulation	117
5. Conclusion.....	124
Conclusion générale	125
Bibliographie	128
Résumé	136

Listes des Figures

Figure 1-1 L'éclairage naturel à partir du patio (Dokkar et al. 2016).	5
Figure 1-2 les Plâtre (Roche, 1973).	5
Figure 1-3 Les produits de palmier (Roche, 1973).	6
Figure 1-4 Les arcs (Lebsir, 2016).	6
Figure 1-5 La taskift (Roche, 1973).	7
Figure 1-6 L'escalier (Roche, 1973).	7
Figure 1-7 l'étage (Roche, 1973).	8
Figure 1-8 L'espace ombré (Mazouz, 2006).	8
Figure 1-9 Plans d'une maison traditionnelle d'Ouargla (Lebsir, 2016).	9
Figure 1-10 Entrées de maison, seuil et escalier menant de la rue à 1ā'lli (Lebsir, 2016).	10
Figure 1-11 Matériaux dérivés du palmier (Dokkar et al. 2016).	11
Figure 1-12 Plan d'une maison traditionnelle de l'EL Oued (Lebsir, 2016).	12
Figure 1-13 La cour dans une maison villageoise et une maison rurale à Guemar (Lebsir, 2016).	13
Figure 1-14 Chambres donnant sur cour et intérieur d'une chambre (Lebsir, 2016).	13
Figure 1-15 Arcades et Sabat dans une maison villageoise à Guemar (Lebsir, 2016).	14
Figure 1-16 Pierre« Lous »et« Tafza » (Lebsir, 2016).	15
Figure 1-17 Coupe et vue de dessous de la coupole (Benarbia, 2012).	15
Figure 1-18 Toiture en coupoles à Oued Souf (Gettyimages).	16
Figure 1-19 Circulation d'air à travers la coupole (Dokkar et al., 2016).	17
Figure 1-20 Les voûtes (Lebsir, 2016).	17
Figure 1-21 Maison de région M'zab (Quintessences).	18
Figure 1-22 Maison troglodyte à la périphérie de Matmata, Tunisie (Franceinfo).	19
Figure 1-23 Structures souterraines de la province de Shanxi, Chine (Savvyleo).	19
Figure 1-24 Structures souterraines de la montagne Sahand dans le village de Kandovan en Iran (Inhabitat).	20
Figure 1-25 La ville souterraine de Cappadoce en Turquie (Dreamstime).	20
Figure 1-26 Température mensuelle moyenne dans la région de Ghardaia.	22
Figure 1-27 Température mensuelle moyenne dans la région de Ouargla.	22
Figure 1-28 Température mensuelle moyenne dans la région de Touggourt.	23
Figure 1-29 Température mensuelle moyenne dans la région de El-oued.	23
Figure 1-30 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel. (Ecosolaire).	24
Figure 1-31 l'ensoleillement moyen annuel dans l'Algérie (Ministère De L'énergie Et Des Mines, 2002-2011).	24
Figure 2-1 Schéma du système d'échangeur air-sol.	27
Figure 2-2 Situation géographique de la Daïra de METLILI.	28
Figure 2-3 Température mensuelle de METLILI (Weather underground).	28
Figure 2-4 Dimensions de la chambre semi-souterraine.	29
Figure 2-5 Résidence avec local semi-souterrain à Metlili.	30
Figure 2-6 Forme et dimensions du local traditionnel.	32
Figure 2-7 Local semi-souterrain.	34
Figure 2-8 Plan architectural du premier étage.	35
Figure 2-9 La forme du toit à l'avant.	36
Figure 2-10 Forme du toit de la partie supérieure.	36
Figure 2-11 La forme du mur extérieur.	37

Figure 2-12 La forme du mur intérieur.....	37
Figure 2-13 Consommation énergétique finale national, par secteur (Ministère de l'énergie, 2020)..	38
Figure 2-14 Consommation annuelle d'électricité d'une maison au sud de l'Algérie	39
Figure 3-1 Répartition de la température dans une plaque.....	50
Figure 3-2 Schéma du transfert de chaleur par convection.	50
Figure 3-3 Différence d'absorption entre les murs de couleur foncée et claire.....	51
Figure 3-4 Domaine de calcul de local traditionnel.	54
Figure 3-5 Tests d'indépendance du maillage.	55
Figure 3-6 Température intérieure à $z = 2,4$ m et $x = 1,7$ m.	56
Figure 3-7 Contours de température dans la conception 3D du local traditionnel.	57
Figure 3-8 Contours de température sur le plan horizontal à $y = 2$ m de haut du local traditionnel. ...	57
Figure 3-9 Contours de température sur le plan médian vertical à $x = 1,7$ m du local traditionnel.	58
Figure 3-10 Contours de vitesse dans la conception 3D du local traditionnel.	58
Figure 3-11 Contours de vitesse sur le plan horizontal à $y = 2$ m de haut du local traditionnel.	59
Figure 3-12 Contours de vitesse sur le plan médian vertical à $x = 1,7$ m du local traditionnel.	59
Figure 3-13 Température souterraine en fonction de la profondeur (Saifi et al., 2015).....	61
Figure 3-14 Températures dans la journée (15/07/2018) dans la ville de Metlili	62
Figure 3-15 Contours de température du local proposé avec convection naturelle.....	63
Figure 3-16 Contours de température dans le plan horizontal du local proposé.	63
Figure 3-17 Contours de température dans le plan médian du local proposée.....	64
Figure 3-18 Température sur l'axe médian du local ($x = 2,55$ m, $z = 2,4$ m).	64
Figure 3-19 Contours de vitesse du local proposé avec convection naturelle.....	65
Figure 3-20 Contours de vitesse dans le plan horizontal du local proposé	65
Figure 3-21 Contours de vitesse dans le plan médian du local proposé.....	66
Figure 3-22 Contours de température du local proposé, avec ventilateur.	67
Figure 3-23 Contours de température dans le plan horizontal du local proposé, avec ventilateur.....	67
Figure 3-24 Contours de température dans le plan médian du local proposé, avec ventilateur.	68
Figure 3-25 Température à l'axe médian de local ($x = 2,55$ et $z = 2,4$ m) du local, avec ventilateur...	68
Figure 3-26 Contours de vitesse du local proposé, avec ventilateur.	69
Figure 3-27 Contours de vitesse dans le plan horizontal du local proposé, avec ventilateur.	69
Figure 3-28 Contours de vitesse dans le plan médian du local proposé, avec ventilateur.	70
Figure 3-29 Amplitude de vitesse sur l'axe $y = 1,9$ m, $z = 2,4$ m. (avec ventilateur).....	70
Figure 3-30 Comparaison entre le local traditionnel et les designs proposés.....	71
Figure 4-1 Installation destinée au chauffage des maisons.	74
Figure 4-2 Chauffe-eau solaire en thermosiphon, (a) avec échangeur, (b) sans échangeur.	75
Figure 4-3 Chauffe-eau solaire, avec échangeur à l'Intérieure de réservoir.....	76
Figure 4-4 Collecteur PV/T à air.....	77
Figure 4-5 Collecteur PV/T à eau.....	78
Figure 4-6 Collecteur PV/T bi fluide air-eau.	78
Figure 4-7 Interface graphique METEONORM.	80
Figure 4-8 L'interface TRNSYS studio de Projet de validation.	80
Figure 4-9 L'interface TRNBuild de projet de validation.....	81
Figure 4-10 Schéma mur extérieur.....	83
Figure 4-11 Schéma du mur extérieur.....	83
Figure 4-12 Schéma du mur intérieur.....	83
Figure 4-13 Schéma du mur intérieur.....	84
Figure 4-14 Schéma du mur intérieur.....	84
Figure 4-15 Schéma de la toiture.	84

Figure 4-16 Schéma du Plancher bas.	84
Figure 4-17 Variations annuelles horaires de température ambiante.	86
Figure 4-18 Schedule Type Manager System.	87
Figure 4-19 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 1 sans optimisation. ...	87
Figure 4-20 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 1 avec optimisation.	88
Figure 4-21 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 2 sans optimisation. ...	88
Figure 4-22 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 2 avec optimisation.	88
Figure 4-23 Variations annuelles horaires de la température dans la cuisine sans optimisation.	89
Figure 4-24 Variations annuelles horaires de la température dans la cuisine avec optimisation.	90
Figure 4-25 Variations annuelles horaires de la température dans le séjour sans optimisation.	90
Figure 4-26 Variations annuelles horaires de la température dans le séjour avec optimisation.	91
Figure 4-27 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 1.	92
Figure 4-28 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 2.	92
Figure 4-29 Besoins énergétiques mensuels de la cuisine.	93
Figure 4-30 Besoins énergétiques mensuels du séjour.	94
Figure 4-31 Evolution mensuelle des besoins énergétiques totaux.	95
Figure 5-1 Jonction P-N d'un semi-conducteur.	97
Figure 5-2 Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.	98
Figure 5-3 les différents composants photovoltaïques (cellule, panneau, champ).	99
Figure 5-4 Cellule Monocristallin.	99
Figure 5-5 Cellule poly cristalline.	99
Figure 5-6 Cellule amorphe.	99
Figure 5-7 Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.	96
Figure 5-8 Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.	97
Figure 5-9 Caractéristique (I.V) d'un générateur photovoltaïque.	98
Figure 5-10 Caractéristique (P.V) d'un générateur photovoltaïque.	99
Figure 5-11 Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) (Messaoudi et al. 2018).	99
Figure 5-12 Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.	100
Figure 5-13 Schéma du Convertisseur DC/DC.	100
Figure 5-14 Schéma de convertisseur DC/DC Buck en MATLAB-SIMULINK.	101
Figure 5-15 La forme de variation en fonction du rapport cyclique.	102
Figure 5-16 Caractéristique de puissance dans l'algorithme P&O.	103
Figure 5-17 Organigramme de la méthode Perturbe & Observe.	103
Figure 5-18 Schéma de la commande MPPT P&O en MATLAB-SIMULINK.	104
Figure 5-19 Classification selon la logique classique(booléenne).	105
Figure 5-20 Classification selon la logique Floue.	105
Figure 5-21 Classification selon la logique classique(booléenne).	106
Figure 5-22 Classification selon la logique Floue.	106
Figure 5-23 Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	108
Figure 5-24 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.	108
Figure 5-25 Les sous-ensembles pour les entrées E et CE.	109
Figure 5-26 Méthode d'interférence MAX-MIN.	111
Figure 5-27 Les sous-ensembles pour la sortie d (α).	112
Figure 5-28 Schéma de la commande MPPT floue en MATLAB-SIMULINK.	112
Figure 5-29 Schéma simple de notre générateur photovoltaïque.	114
Figure 5-30 Caractéristiques (P, V) pour différents éclaircissements et une température standard avec différentes charges.	114

Figure 5-31 Caractéristiques (I, V) pour différents éclairagements et une température standard avec différentes charges.	115
Figure 5-32 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement sans régulation pour une charge constant $R = 20\Omega$	116
Figure 5-33 Allure de la puissance face à une variation de charge sans régulation pour un éclairage constant $G = 800\text{w/m}^2$	116
Figure 5-34 le point de puissance maximal MPP (maximum power point).	117
Figure 5-35 le droit de charge optimal.	117
Figure 5-36 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge constante $R = 10\Omega$	118
Figure 5-37 Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT P&O pour un éclairage constant $G = 1000\text{ w/m}^2$	119
Figure 5-38 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge variable.	120
Figure 5-39 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT flou pour une charge constante $R = 10\Omega$	120
Figure 5-40 Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT flou pour un éclairage constant $G = 1000\text{ w/m}^2$	121
Figure 5-41 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT flou pour une charge variable.	122
Figure 5-42 Allure de comparaison de puissance entre les deux commandes MPPT (P&O et floue).	122

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique (Oudrane, 2018).....	25
Tableau 3-1 Les expressions de paramètres physiques de l'air (Rasmussen, 1997) et (The Engineering ToolBox).	53
Tableau 3-2 Condition aux limites du local traditionnel.....	55
Tableau 3-3 Résultats de la validation du modèle par rapport aux données expérimentales.	56
Tableau 3-4 Condition aux limites du local semi-souterrain.	62
Tableau 4-1 Caractéristiques des zones et ses dimensions.....	82
Tableau 4-2 Caractéristiques thermiques des matériaux (Hamdani, 2016) et (Trnsys16, 2016).	82
Tableau 4-3 Matériaux constituant les murs extérieurs	83
Tableau 4-4 Matériaux constituant les murs extérieurs de la cuisine et de la SDB	83
Tableau 4-5 Matériaux constituant les murs intérieurs.	83
Tableau 4-6 Matériaux constituant les murs intérieurs de la cuisine et de la SDB	84
Tableau 4-7 Matériaux constituant les murs intérieurs de la cuisine et de la SDB.....	84
Tableau 4-8 Matériaux constituant les toitures.	84
Tableau 4-9 Matériaux constituant le plancher bas.....	84
Tableau 4-10 Utilisation des zones pendant la semaine.....	86
Tableau 4-11 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 1.....	91
Tableau 4-12 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 2.....	92
Tableau 4-13 Besoins énergétiques mensuels de la cuisine.	93
Tableau 4-14 Besoins énergétiques mensuels du séjour.	94
Tableau 4-15 Besoins énergétiques mensuels totaux.	94
Tableau 5-1 Fonctionnement de l'algorithme P&O.	102
Tableau 5-2 Tableau de réglage floue.....	109
Tableau 5-3 caractéristiques électriques de Générateur Photovoltaïque.....	113
Tableau 5-4 comparaison entre le système sans et avec régulation.	123

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
A	Surface perpendiculaire au flux thermique	[m ²]
C _f	Coefficient de forme	[m ⁻¹]
C _p	Chaleur spécifique à pression constante	[J/kg.K]
G	Accélération de la gravité	[m.s ⁻²]
h _l	Hauteur de local	[m]
h	Coefficient d'échange thermique par convection	[W/m ² K]
h ₀	Coefficient de transfert de chaleur à la surface extérieure du mur	[W/m ² C°]
I _T	Rayonnement global	[W/m ²]
I _d	Rayonnement direct	[W/m ²]
I _b	Rayonnement diffus	[W/m ²]
l	Longueur de local	[m]
N	Nombre du jour de l'année	-
P	Pression dimensionnelle	[Pa]
q"	Flux de chaleur	[w.m ⁻²]
Q	Puissance volumique dissipée	[W.m ³]
R _b	Rayonnement direct sur une surface inclinée	[-]
T	Température dimensionnelle	[K]
T _e	La température équivalente	[K]
T _o	La température ambiante de milieu extérieur	[K]
u, v	Composantes des vitesses	[m/s]
U, V	Composantes adimensionnelles des vitesses.	[m/s]
x, y	Coordonnées d'espace dimensionnelles	[m]
X, Y	Coordonnées d'espace adimensionnelles.	[-]
Symboles grecs		
α	Coefficient absorption	[-]
B	Coefficient de dilatation thermique volumétrique de l'air	[K ⁻¹]
ε	Émissivité de la surface	[-]
P	Masse volumique	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
N	Viscosité cinématique	[m ² /s]
φ	Flux thermique	[W]
δ	Angle de déclinaison	[°]
Λ	Conductivité thermique	[W/m.K]

Nombres adimensionnels

Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Gr	Nombre de Grashof	[-]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
Re	Nombre de Rynolds	[-]

Introduction générale

L'utilisation des énergies fossiles entraîne des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'augmentation de la pollution terrestre. L'exploitation excessive des ressources fossiles menace leur disponibilité pour les générations futures et peut engendrer des crises énergétiques, comme celles survenues dans les années 70. Ces enjeux poussent les pays à rechercher des alternatives, se tournant vers des sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, la biomasse et la géothermie. Ces énergies renouvelables représentent des solutions prometteuses pour rivaliser avec les énergies fossiles. Leur développement permettrait non seulement de satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité, mais aussi de préserver l'environnement (Yoro et Daramola, 2020).

Dans le climat chaud et aride du sud de l'Algérie, le refroidissement des bâtiments demande une quantité significative d'énergie pour assurer le confort thermique (Ghedamsi et al., 2016). Pour assurer ce confort, des climatiseurs mécaniques à forte consommation d'énergie sont utilisés. Mais, l'intégration de techniques passives peut réduire la consommation énergétique. La ventilation naturelle est une technique courante peut aider à abaisser la température interne dans les maisons traditionnelles et les constructions bioclimatiques. En général, on utilise diverses techniques, comme l'emploi de matériaux à changement de phase, couverture végétale, ventilation par cheminée solaire, connections par des tubes échangeurs air-sol et construction souterraines. Les deux dernières méthodes sont très attractives dans les bâtis, notamment pour refroidir les résidences à plain-pied, qui sont très sollicités par des flux thermiques externes provenant des rayonnements solaires directs. Notamment, pour les résidences isolées où l'alimentation par groupe électrogène est très coûteuse, donc une alimentation par les panneaux photovoltaïques est préférée, notons qu'elle nécessite une bonne maîtrise de la gestion d'énergie.

La production d'énergie est essentielle pour l'ensemble des activités humaines et pour satisfaire les besoins énergétiques de tous les pays. Depuis les années 1960, cette production a triplé. Aujourd'hui, la majorité de l'énergie mondiale est produite à partir de sources fossiles, telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel, ainsi que de l'uranium. (benhamida, 2015). L'Algérie est l'un des pays qui disposent de l'un des plus grands gisements solaires au monde (thermique et photovoltaïque). L'exploitation de cette dernière source a connu une forte croissance durant ce dernier siècle.

Dans ce contexte, notre étude propose une approche simplifiée concernant le conditionnement de l'air et l'alimentation électrique pour une résidence située en milieu rural.

La présente thèse se structure en cinq chapitres, avec une conclusion générale pour clôturer. Le premier chapitre explore les dimensions sociologiques et les spécificités de l'architecture traditionnelle des oasis sur plusieurs siècles. Il analyse également différentes stratégies de conception passive, incluant l'orientation des édifices, l'étanchéité à l'air, l'isolation, les ouvertures, ainsi que la ventilation et l'éclairage naturels. (Dokkar et al. 2016) et (Lebsir, 2016). Ainsi, un bref revu est donné sur les matériaux de construction de bonnes isolations thermiques et des épaisseurs de murs élevés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé une étude de conception d'une résidence qui contient un local semi-souterrain et plusieurs pièces au premier étage. L'approche est basée sur la réduction de la consommation énergétique pendant la période d'été où l'exploitation des formes de constructions traditionnelle « Sguifa » (SABAT) et « Gouba » contribue à l'abaissement de la forte chaleur. Une évaluation globale des aspects énergétiques du secteur résidentiel est ainsi réalisée en tenant compte des données climatiques spécifiques à la région étudiée.

Le troisième chapitre traite le comportement thermique d'un local semi-souterrain dans le climat chaud par une simulation numérique tridimensionnelle de flux d'air et des mesures expérimentales de la température intérieure. Les résultats de la simulation du flux d'air dans le cas de base du local semi-souterrain sont validés par des données expérimentales collectées dans une période estivale chaude. Deux conceptions d'amélioration sont proposées et examinées dans la situation critique de la température ambiante. Les résultats obtenus sont sanctionnés par une publication internationale au « Journal of Thermal Engineering » (Messaoudi et al., 2021).

Le quatrième chapitre est ensuite dédié à l'analyse de l'évolution des besoins énergétiques pour couvrir les consommations annuelles de la résidence en fonction des mesures énergétiques d'efficacité choisies pour un bâtiment conçu sur la base des constructions conventionnelles et les données géographiques et météorologiques locales. Le logiciel TRNSYS a été utilisé pour simuler et déterminer ces besoins énergétiques tout en tenant en compte les matériaux de construction et les modes d'occupation des différentes pièces de la résidence.

Enfin, le cinquième chapitre contient une étude détaillée sur le système d'alimentation constitué d'un panneau photovoltaïque. Le modèle du système est élaboré avec le logiciel de simulation Matlab/Simulink, permettant l'étude du comportement statique et dynamique du système, tant avant qu'après l'application de la régulation. Un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) de type P&O (Perturb and Observe) est d'abord introduit, suivi d'une approche utilisant la logique floue pour optimiser les performances du contrôle.

Chapitre 1 Etude sociologique : climat et bâtiment traditionnel

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude sociologique de notre région à travers la description des bâtis de Ghardaïa, Ouargla, et El-oued. Aussi, nous présentons quelques exemples de constructions souterraines et semi-souterraines en Algérie et au niveau mondial. Enfin, on collecte les caractéristiques de la région en fonction de la situation géographique et ses aspects climatiques.

2. Etude sociologique

Actuellement, la sociologie d'architecture est l'étude de l'environnement bâti et sa relation avec les habitudes des occupants, ainsi sa projection dans l'architecture destinée aux sociétés modernes. Ce genre d'étude propose des approches à une sociologie moderne inspirée des constructions anciennes. Pour cerner cette tâche, on décrit les anciens bâtis de nos régions c'est le cas de Oued M'zab, Ouargla et Oued-Souf.

2.1. Description des bâtis à Ghardaïa

Ghardaïa ou Oued M'zab est une région très connue au niveau international par son patrimoine et ses bâtiments anciens. Elle est située dans le Sahara algérien. Ghardaïa est une ville saharienne unique du point de vue architectural, urbain et environnemental.

2.1.1. Maisons

À Ghardaïa les résidences traditionnelles sont construites sur une masse rocheuse. La maison se compose d'un rez-de-chaussée, d'un étage, des toits terrasses et souvent, d'une cave creusée dans la masse rocheuse. La forme de maisons de Ghardaïa est généralement carrée ou rectangulaire avec une entrée marquée par un seuil. On accède à la maison par l'entrée en chicane qui assure de garder l'intimité, bien que la porte reste ouverte. Le centre de la maison nommé « Ammas an Tadert », à partir duquel s'effectue la répartition des fonctions et la diffusion des espaces. Cet espace central limité par piliers à un trou aménagé au plafond « patio », où circule la plus grande partie d'air et rentre l'essentielle d'éclairage. Sur l'espace central s'ouvre l'ensemble des espaces constituant le rez-de-chaussée ; Tizefri « salon des femmes », chambres, cuisine, ... L'étage est structuré d'une façon similaire au rez-de-chaussée, avec un espace central bordé de portiques exposés au Sud et à l'Est. Une portion d'escalier qui donne sur un toit terrasse sert de dortoir durant les nuits d'été. Le Chebek (patio) est à double rôle : il

permet aux rayons solaires de pénétrer à l'intérieur de la maison, ainsi la ventilation naturelle (Dokkar et al. 2016).

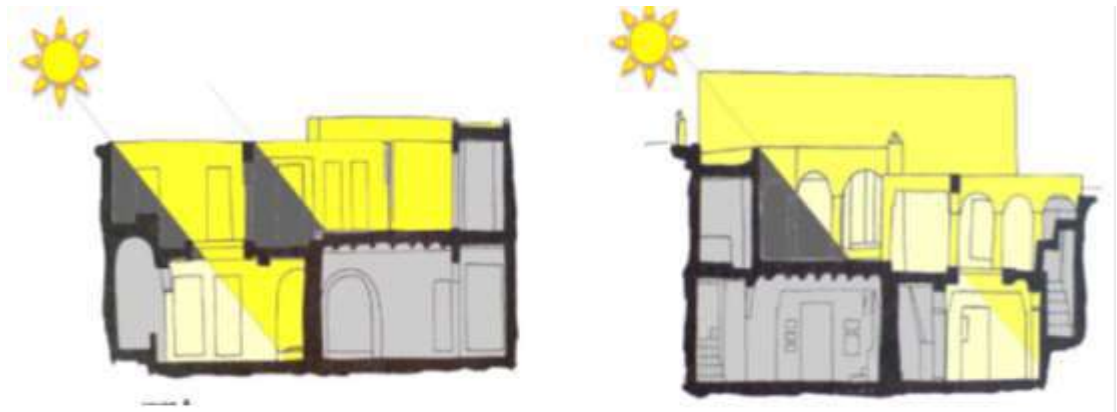


Figure 1-1 L'éclairage naturel à partir du patio (Dokkar et al. 2016).

2.1.2. Matériaux de construction

La pierre est un matériel durable et réutilisable, matériel massif qui offre le confort thermique et phonique, pour toutes ces raisons et il est largement utilisé comme matériel de construction dans la région notons qu'il nécessite de la main d'œuvre qualifiée.

2.1.2.1. La pierre

Dans la maison traditionnelle de Ghardaïa la pierre utilisée pour la construction se caractérise par sa nature calcaire, pas ou très peu d'intervention de taille, sa forme est aléatoire jusqu'au quadrangulaire, son origine est carrière, épierrement, torrent de montagne, sa disponibilité est suffisante dans la région de Ghardaïa. L'assemblage des pierres se fait par un mortier composé d'un mélange de sable, ciment et lait de chaux (Dokkar et al. 2016).

2.1.2.2. Plâtre

Ce matériau provient d'un gisement de gypse abondant sur le site, connu pour sa prise rapide et pouvant être manipulé facilement à mains nues, sans outils. (Roche, 1973).



Figure 1-2 les Plâtre (Roche, 1973).

2.1.2.3. Le palmier

Le bois est employé pour la menuiserie, tandis que les nervures de palmes sont utilisées dans diverses opérations, comme le coffrage et la construction des célèbres arcs du M'ZAB. (Roche, 1973).



Figure 1-3 Les produits de palmier (Roche, 1973).

2.1.3. Les techniques de construction

2.1.3.1. Les arcs

L'arc est un élément emblématique du M'ZAB, construit à partir de palmes fixées à la maçonnerie et ensuite enduites. On le retrouve principalement dans les passages et les galeries, où il crée un mouvement irrégulier en raison des différentes dimensions des palmes. (Lebsir, 2016).



Figure 1-4 Les arcs (Lebsir, 2016).

2.1.3.2. La Taskift

Il s'agit d'une pièce rectangulaire utilisée comme passage et pour l'installation du métier à tisser. Sa position dans un courant d'air favorise un travail agréable dans la fraîcheur. Des niches d'environ 0,5 m sont creusées dans les murs, servant de mobilier. (Roche, 1973).



Figure 1-5 La taskift (Roche, 1973).

2.1.3.3. L'escalier

L'escalier se décline en deux types : l'un est féminin et familial, tandis que l'autre est masculin et réservé aux invités.

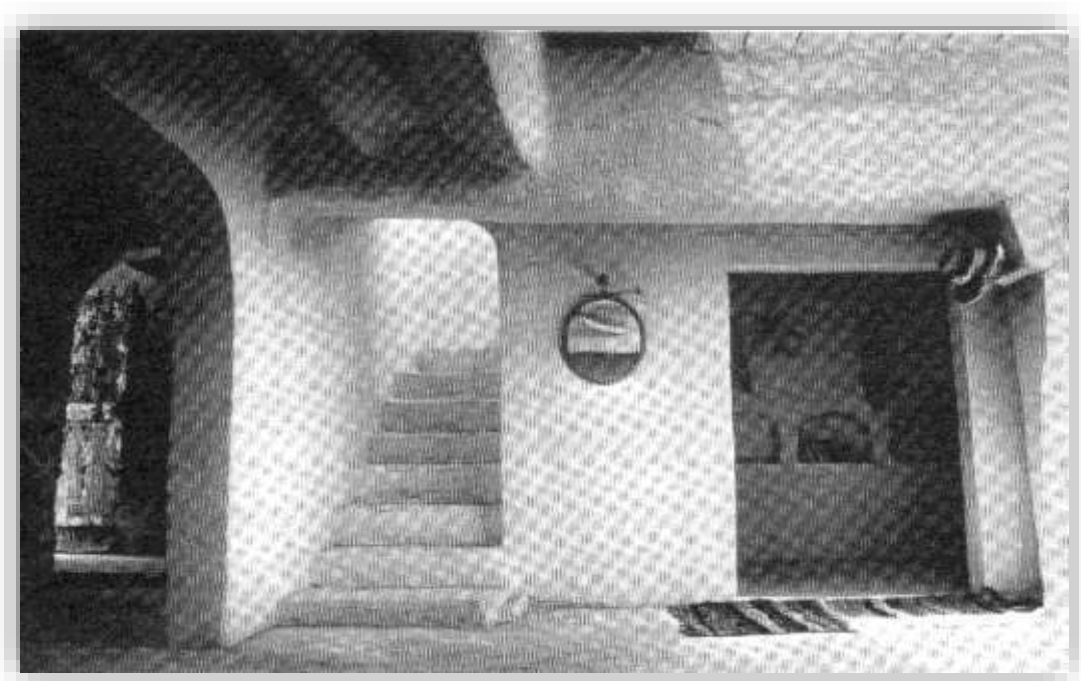


Figure 1-6 L'escalier (Roche, 1973).

2.1.3.4. L'étage

À l'étage, l'organisation présente une logique constructive qui s'harmonise avec l'ensemble des murs et des poteaux (Roche, 1973).

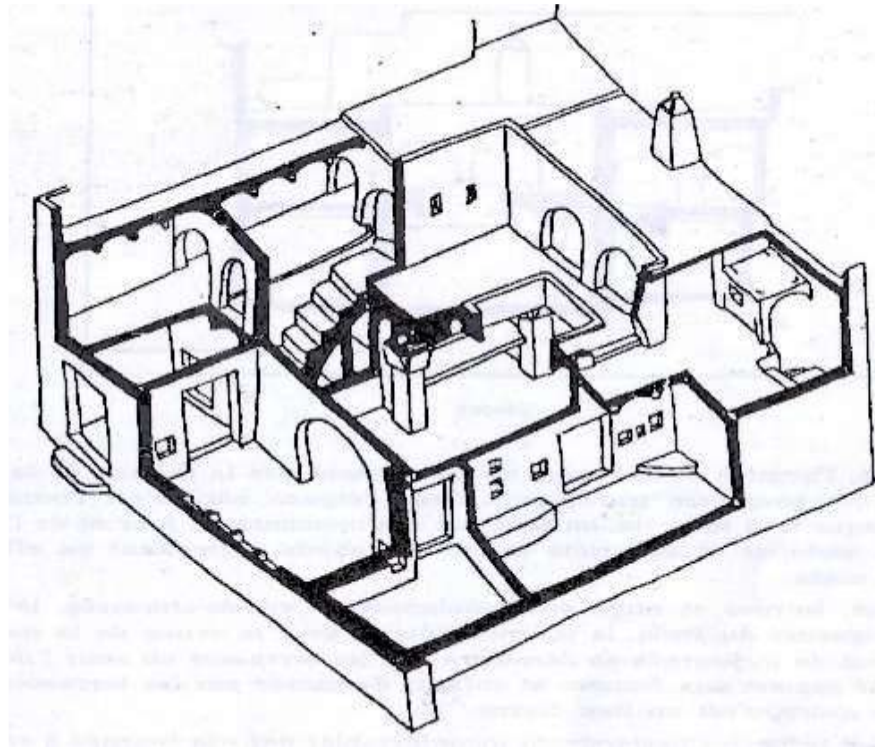


Figure 1-7 l'étage (Roche, 1973).

2.1.3.5. L'espace couvert

L'espace couvert, c'est la partie couverte de l'étage avec un portique et ouverte au nord pour assurer la continuité d'ombre, qui permet les bonnes activités maisonnières durant le jour (Dokkar et al. 2016).



Figure 1-8 L'espace ombré (Mazouz, 2006).

2.2. Description des bâtis à Ouargla

Ouargla est un centre de vie extrêmement ancien. Situé au sud-est d'Algérie. Ouargla, qui se distingue, comme Ghardaïa par des bâtis traditionnels dans el-ksar et autres.

2.2.1. Maisons

La maison "Ksourienne" à Ouargla est une structure close et opaque. Deux idées principales émergent de son utilisation : l'occupation de l'espace selon les saisons et l'aménagement en fonction du sexe des membres de la famille. Pendant la saison froide, les soirées se déroulent au rez-de-chaussée pour se protéger des rigueurs du froid en fin d'après-midi et au début de soirée. La mitoyenneté et les portes du bas qui communiquent, parfois même au niveau de la terrasse, facilitent le passage des femmes et des enfants d'une maison à l'autre (Lebsir, 2016).

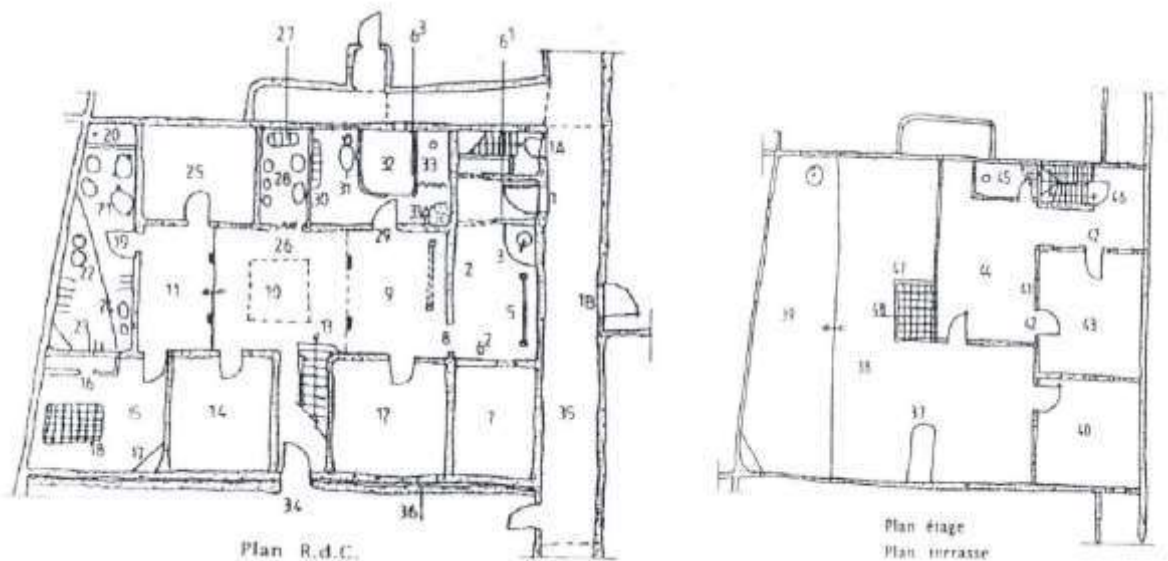


Figure 1-9 Plans d'une maison traditionnelle d'Ouargla (Lebsir, 2016).

2.2.2. Références architecturales

2.2.2.1. L'entrée de la maison et le seuil

La maison typique comporte deux portes d'entrée. La porte principale, appelée « tāwurt n imi n āhtubā », donne accès au niveau supérieur depuis la rue et est réservée à l'accueil des invités masculins. La seconde porte, « tāwurt n'uglād », est dédiée à la famille et s'ouvre sur l'extérieur. Le seuil constitue un élément distinctif, symbolisant la transition entre l'extérieur et l'intérieur (Lebsir, 2016).



Figure 1-10 Entrées de maison, seuil et escalier menant de la rue à lā'lli (Lebsir, 2016).

2.2.2.2. Skifa

Le skifa est situé entre la porte d'entrée et la cour intérieure de la maison, servant de véritable intermédiaire entre l'extérieur et l'intérieur. Il est doté d'un muret « āmmud » suffisamment haut pour préserver l'intimité du foyer. Dans le coin derrière l'āmmud se trouve la meule domestique à bras « tāsirt », fixée sur un banc maçonné « āddukkān ». Non loin de là se dresse le traditionnel métier à tisser « āzzettā », où les femmes travaillent assises sur des tabourets, profitant de la lumière de la cour (Lebsir, 2016)

2.2.2.3. Les chambres

Ces chambres se trouvent à gauche de « tāhzzā », la première chambre de la maison, souvent occupée par la grand-mère, d'où son nom « ikumār n twāsārt ». Autour du « slām », les autres chambres s'organisent selon un ordre précis. La première chambre d'enfants, « ikumār n wāsul », est adjacente à la salle d'eau « ilemsi », tandis que la chambre du maître de maison, « ikumār n bāb n tāddārt », se situe à côté du cellier « tāzeqqā ». La deuxième chambre d'enfants, également « ikumār n wāsul », est dans le prolongement de celle des parents. La plupart de ces chambres sont équipées de petites fenêtres donnant sur « āmmisiddār », offrant ainsi un éclairage et une ventilation naturelle limités. Toutes ces pièces ont une largeur relativement constante de 2 à 3 mètres, distance déterminée par la longueur du tronc de palmier « agrur hāsbāa » qui constitue la structure de leur plancher (Lebsir, 2016).

2.2.3. Matériaux de construction

Nul doute que le fabriquant de cette époque a découvert après plusieurs expériences la composition de la matière végétale que nous n'en sommes pas en courant parce qu'ils sont tenu d'avoir la vulnérabilité particulière à domicile pour la santé humaine par la distribution appropriée de température durant les quatre saisons (Dokkar et al. 2016).



Figure 1-11 Matériaux dérivés du palmier (Dokkar et al. 2016).

2.3. Description des bâtis à EL Oued

Située dans le Grand Sud de l'Algérie, El Oued se distingue par son architecture en voûtes et en coupoles. Les structures traditionnelles de Souf se déclinent en deux typologies complémentaires : le semi-nomadisme et la semi-sédentarité.

2.3.1. Maisons

La culture constructive de la communauté soufie reste constante, soulignant son homogénéité et sa spécificité architecturale. La combinaison typologie-matériaux-techniques fait de Souf une région où la qualité architecturale s'harmonise avec la culture. Que la maison soit « rurale » ou « villageoise », la maison traditionnelle soufie se caractérise par une cour ouverte dans le premier cas et fermée dans le second. Appelée « Houche » ou « Dar », ce terme désigne également la pièce qui constitue la plus petite unité de la maison, et permet d'évoluer progressivement en découvrant les différents éléments et espaces :

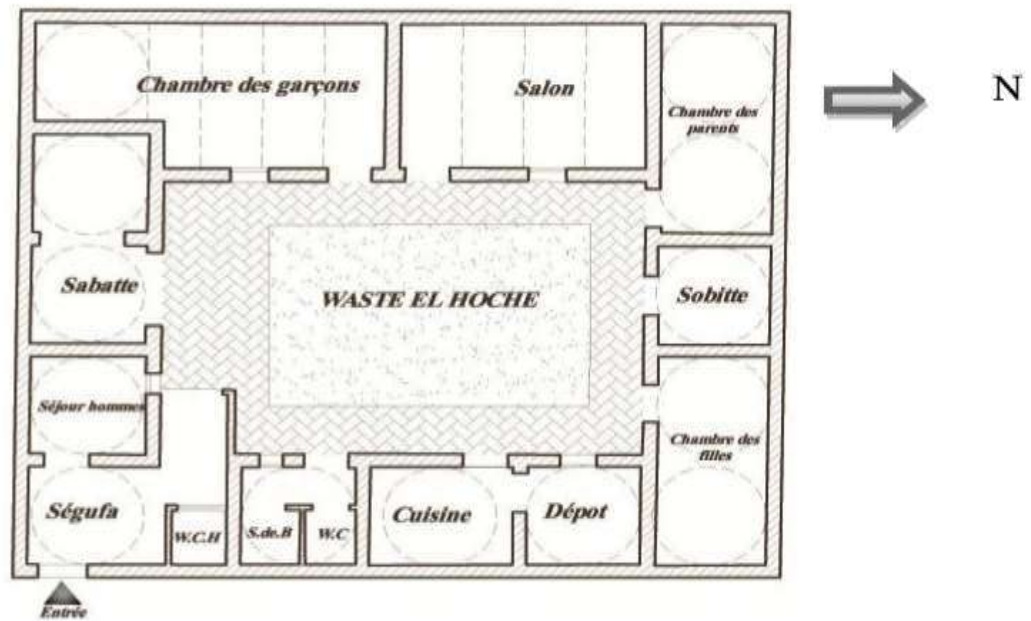


Figure 1-12 Plan d'une maison traditionnelle de l'EL Oued (Lebsir, 2016).

2.3.2. Références architecturales

2.3.2.1. L'entrée

Il s'agit d'une entrée en chicane, équipée d'un seuil plus élevé que l'intérieur de la maison et d'une porte généralement à deux vantaux, suffisamment large pour permettre l'accès aux personnes ainsi qu'aux animaux d'élevage (Lebsir, 2016).

2.3.2.2. « Sguifa »

L'entrée extérieure est toujours suivie d'un large couloir, une sorte de hall appelé « Sguifa », qui se termine d'un côté par une autre entrée donnant un accès direct à la maison. La « Sguifa » peut également servir d'espace d'accueil (Lebsir, 2016).

2.3.2.3. La cour « El Houche »

Situé au centre de la maison, cet espace multifonctionnel sert de point de distribution et constitue le cœur de la vie familiale. La famille peut comprendre plusieurs ménages, chacun occupant une « dar » et utilisant la cour ainsi que les pièces de service de manière collective (Figures 1.13).



Figure 1-13 La cour dans une maison villageoise et une maison rurale à Guemar (Lebsir, 2016).

2.3.2.4. Les chambres

Les chambres, organisées de part et d'autre de la cour, varient en nombre selon le statut et la taille de la famille. À l'origine, elles ne comportent que des portes comme seules ouvertures donnant sur la cour.

La chambre est généralement de forme rectangulaire et est surmontée d'une coupole « Gouba » ou d'une voûte en forme de dôme « Demsa ». Ces éléments constituent l'unité de mesure des dimensions de la chambre, qui peut d'ailleurs en porter le nom (Lebsir, 2016).



Figure 1-14 Chambres donnant sur cour et intérieur d'une chambre (Lebsir, 2016).

2.3.2.5. Le « Sabat »

En tant qu'élément de confort courant, la maison est équipée d'un ou de deux « sabat », situés l'un en face de l'autre, aux côtés sud et nord de la cour (Figure 1.15). Le plus important est celui du sud, qui offre ombre et fraîcheur pendant l'été. Il s'agit d'un abri couvert avec des

arcades ouvertes au nord, formant l'avant-plan des pièces orientées dans la même direction (Lebsir, 2016).

Le sabat du côté nord de la maison s'ouvre sur la cour et est également couvert. Cela permet aux occupants de profiter d'un maximum d'ensoleillement durant les mois d'hiver (Belhadj, 2005).

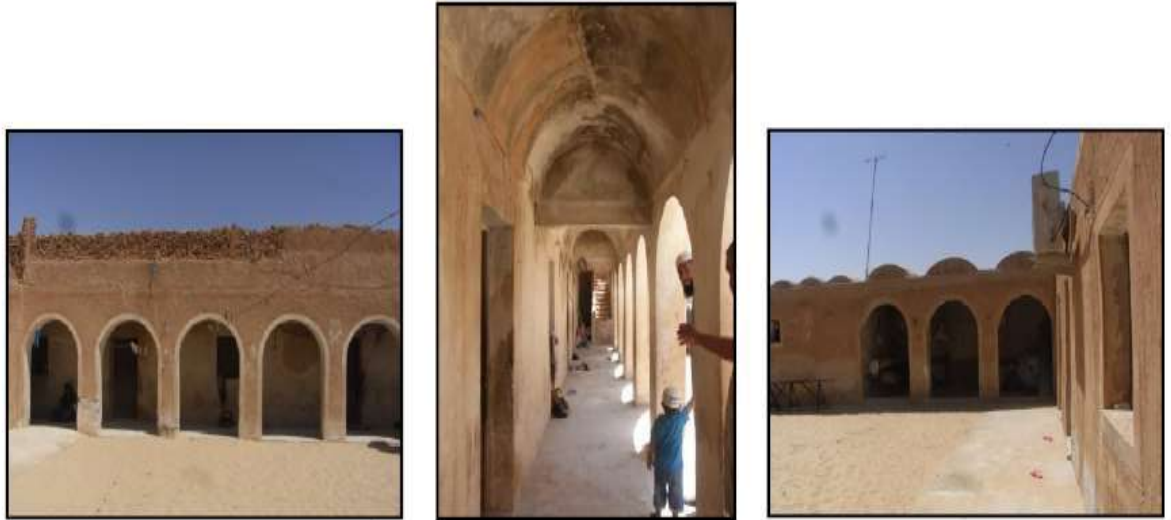


Figure 1-15 Arcades et Sabat dans une maison villageoise à Guemar (Lebsir, 2016).

2.3.3. Matériaux de constructions

Tous les matériaux de construction utilisés sont d'origine locale, notamment le plâtre, le gypse et la rose de sable.

✓ **Le Plâtre**

Le plâtre est employé comme liant et est obtenu par la cuisson de blocs de tafza ou de tercha.

✓ **La Pierre (rose de sable, Lousse)**

Ce matériau se présente sous forme de blocs et se distingue par sa consistance et sa dureté. Il est utilisé en tant que matière première en combinaison avec le plâtre dans le processus de construction (Lebsir, 2016).



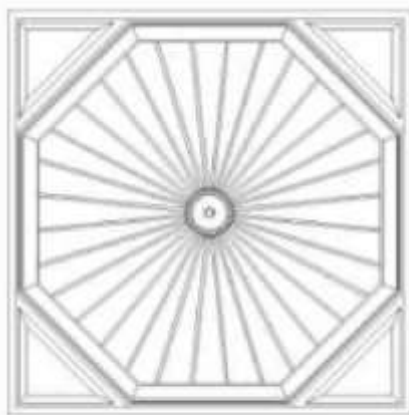
Figure 1-16 Pierre« Lous »et« Tafza » (Lebsir, 2016).

2.3.4. Eléments architectoniques

2.3.4.1. La coupole

C'est une voûte hémisphérique, semi-circulaire, elliptique. La toiture de cette conception est un dôme (Figure 1-17)

L'importance de la coupole est dans la fonction architecturale, les aspects sociaux, traditionnels, symboliques et esthétiques qui exercent une influence sur les espaces (Wagner, 2020).



Vue de dessous



Coupe

Figure 1-17 Coupe et vue de dessous de la coupole (Benarbia, 2012).

Les maisons de type dôme (coupole) sont extrêmement éco- énergétiques en raison de leur forme très résistante aux catastrophes naturelles, aux vents violents ou aux tremblements de terre dévastateurs. La chaleur, la lumière, le bruit sont également répartis. De nos jours, les dômes géodésiques sont connus comme étant le système de construction le plus efficace. Les autres avantages de la structure sont son esthétique et son attrait particulier et c'est pourquoi il

est également recommandé pour les bâtiments publics et pour les attractions touristiques (Othilia, 2013).

En Algérie, notamment à El Oued, les coupoles, dotées d'une fenêtre au sommet, recouvrent soit une partie de la maison, soit la pièce principale d'un bâtiment. Les dômes, en raison de leur forme, présentent une surface de déperdition thermique importante lorsqu'ils sont exposés à la voûte céleste. Pendant la journée, seule une partie de la coupole reçoit les rayons solaires, ce qui limite le réchauffement du dôme. Ces échauffements sont responsables des mouvements convectifs de l'air à l'intérieur du dôme. Les couvertures, principalement en forme de coupoles ou de voûtes, sont conçues pour éliminer le risque de charge due aux pluies et aux dépôts de sable (Akchiche, 2011).



Figure 1-18 Toiture en coupoles à Oued Souf (Gettyimages).

La coupole a pour fonction d'empêcher l'accumulation de sable sur la terrasse. Elle reflète le rayonnement solaire, offre un volume d'air intérieur plus important et assure une meilleure circulation de l'air. De plus, elle contribue à l'esthétique globale du bâtiment.

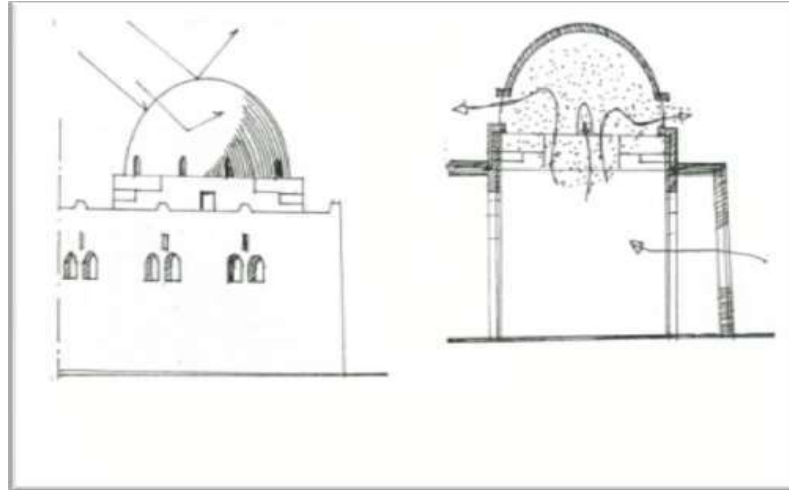


Figure 1-19 Circulation d'air à travers la coupole (Dokkar et al., 2016).

2.3.4.2. Les voûtes

La voûte joue le même rôle de la coupole, mais elle se caractérise par une forme demi-cylindrique et elle est utilisée pour couvrir les grands espaces.



Figure 1-20 Les voûtes (Lebsir, 2016).

3. Construction souterraine et semi souterraine

Dans le contexte de la performance énergétique des bâtiments, l'ancienne idée d'utiliser la terre comme modérateur de température contre les intempéries à un potentiel impressionnant pour devenir une solution solide contre l'inefficacité énergétique des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation dans les bâtiments.

Cette technique de refroidissement passive créative et traditionnelle a également permis d'atteindre la plupart des critères de développement durable concernant la demande mondiale croissante de logements, le changement climatique, l'épuisement des combustibles fossiles ainsi que la superficie et les ressources limitées en terres (Alkaff et al., 2016).

Les constructions souterraines et semi-souterraines en Algérie se retrouvent notamment dans les sous-sols des habitations du M'Zab et dans les balcons de Ghoufi. On observe également ce type d'habitat à Matmata en Tunisie. Par ailleurs, des exemples similaires existent en Turquie, en Iran, en Chine, et dans d'autres pays.

3.1. Habitations du M'Zab

Chaque maison de la région de m'zab a une pièce souterraine et deux niveaux supérieurs, avec un espace au centre, transparent avec une fenêtre de ciel. Pendant la période de l'été (Ham et Golparvar-fard, 2013).



Figure 1-21 Maison de région M'zab (Quintessences).

3.2. Maison troglodyte à Matmata, Tunisie

Les troglodytes de Matmata sont les types de bâtiments appropriés qui répondaient aux besoins fonctionnels et esthétiques de ses habitants. Ces habitations à l'abri de la terre sont des exemples remarquables d'êtres humains qui réussissent à s'adapter à un environnement souvent inhospitalier. Cette réalisation est le fruit d'une expérimentation continue et d'une expérience transmise d'une génération à l'autre. Les habitations de Matmata sont un excellent exemple d'architecture durable, elles sont économes en énergie, respectueuses de l'environnement et économiques. Ils sont une grande source d'inspiration pour un certain nombre de domaines tels que l'architecture, les études environnementales et même l'éco-tourisme ; ces logements peuvent facilement assurer la durabilité économique de l'ensemble de la colonie (Sakr, 2006).



Figure 1-22 Maison troglodyte à la périphérie de Matmata, Tunisie (Franceinfo).

3.3. Structures souterraines dans la province de Shanxi, au nord de la Chine

Les structures souterraines de la province de Shanxi, au nord de la Chine, sont connues sous le nom de Yao Dong. Les trois plans principaux du bâtiment souterrain peuvent être repérés dans cette région (Alkaff et al., 2016).



Figure 1-23 Structures souterraines de la province de Shanxi, Chine (Savvyleo).

3.4. Maisons troglodytes souterraines à l'Iran

Le village historique de Kandovan est l'un des trois villages rocheux du monde. Les maisons de ce village ressemblent à des Ruches d'abeilles au cœur des montagnes. Il existe deux autres villages rocheux dans le monde, le premier est si dans le Dakota du Nord aux États-Unis et l'autre en Turquie. Cependant, Kandovan est le seul village rocheux au monde habité par l'homme depuis quelque 6000 ans. Ce village situé au pied du mont Sahand (Mirrazavi, 2011).



Figure 1-24 Structures souterraines de la montagne Sahand dans le village de Kandovan en Iran (Inhabitat).

3.5. La ville souterraine de Cappadoce

Des villes souterraines et semi-souterraines, au moins 1500 ans, existent dans la région de Cappadoce en Turquie. Ces structures rocheuses artificielles sont les meilleurs exemples de performance à long terme des structures artificielles dans le domaine de l'ingénierie des roches. Elles ont également de bonnes propriétés d'isolation thermique pour être utilisés comme logement et stockage des aliments (Aydan et Ulusay, 2003).



Figure 1-25 La ville souterraine de Cappadoce en Turquie (Dreamstime).

4. Climat de la région

4.1. Situation géographique de la région

4.1.1. Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa couvre une superficie de 49 000 km². Elle est située à une latitude de 30°51' Nord et une longitude de 2°55' Est, avec une altitude moyenne de 380 mètres, à environ 870 km d'Alger.

4.1.2. Ouargla

Ouargla s'étend sur une superficie de 270 030 km². Elle est située à une latitude de 31°57' N et à une longitude de 5°21' E, avec une altitude de 146 mètres, à environ 780 km d'Alger.

4.1.3. Touggourt

La région de Touggourt est située dans le Sud-est de l'Algérie à une distance de 620 km d'Alger, de 160 km d'Ouargla. Ses coordonnées géographiques sont 6° 08' Est et 33° 07' Nord de latitude, avec une altitude de 87 m environ de la surface de la mer.

Administrativement, elle dépend de la wilaya d'Ouargla.

4.1.4. El Oued

Oued Souf, située au sud-est de l'Algérie, fait partie du Grand Erg oriental, au nord-est du Sahara septentrional. Considérée comme la première porte du Sahara, elle couvre une superficie de 44 480 km² et s'étend entre 30° et 40° de latitude Nord, ainsi qu'entre 8° et 9° de longitude. Elle est bordée par la wilaya de Tébessa au nord-est, la wilaya de Khenchla au nord, la wilaya de Biskra au nord-ouest, la wilaya de Djelfa à l'ouest, et la wilaya de Ouargla à l'ouest et au sud.

4.2. Aspect climatique de la région

Les paramètres climatiques, tel que la température, d'évaporation, l'humidité relative, la pluviométrie, le vent et l'insolation, etc. ; sont les facteurs les plus déterminants pour la consommation énergétique, mais la température est le facteur la plus active pour cette consommation.

4.2.1. Température de Ghardaïa

Les températures dépassent 32 °C, tandis que celle du mois le plus froid (janvier) est inférieure à 9,5 °C (Meteoblue).

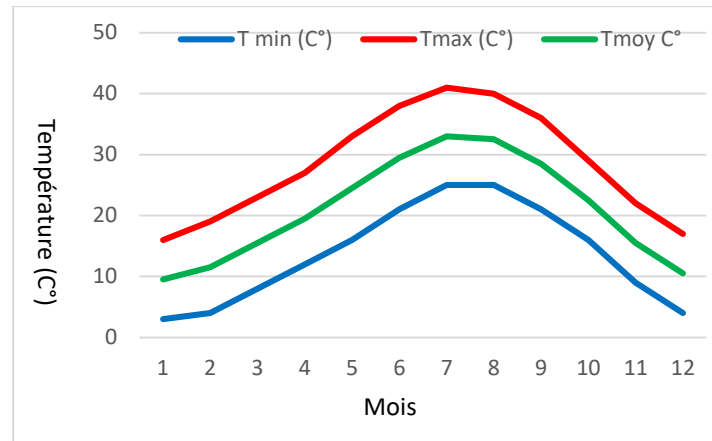


Figure 1-26 Température mensuelle moyenne dans la région de Ghardaia.

4.2.1. Température de Ouargla

Les variations des températures maximales, minimales et moyennes à Ouargla sont illustrées dans la Figure 1-27. Les températures atteignent des niveaux élevés en juillet et en août, dépassant 33,5 °C, tandis que celles du mois le plus froid (janvier) sont inférieures à 11,5 °C. (Meteoblue).

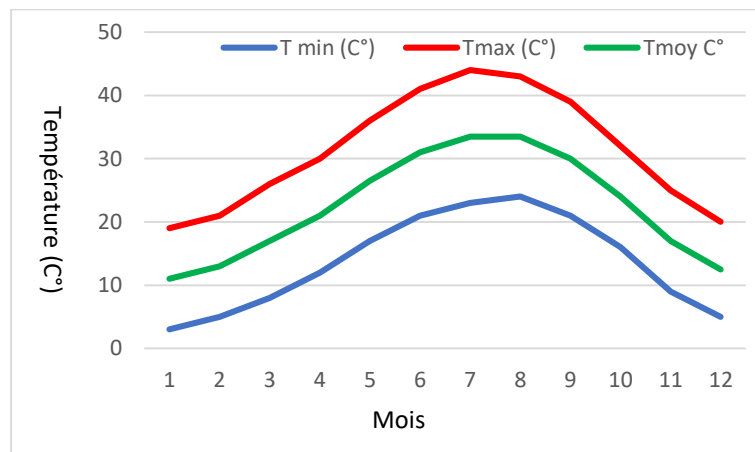


Figure 1-27 Température mensuelle moyenne dans la région de Ouargla.

4.2.2. Température de Tougourt

Les températures sont particulièrement élevées en été, avec une moyenne des mois les plus chauds (juillet et août) dépassant 32 °C, tandis que celle du mois le plus froid (janvier) est inférieure à 11,5°C (Meteoblue).

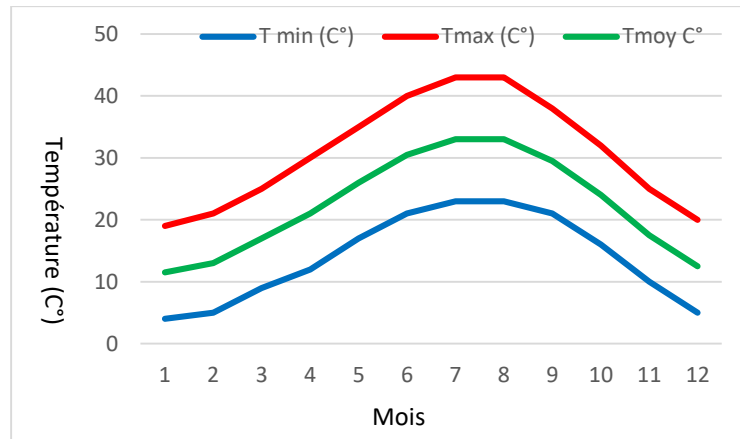


Figure 1-28 Température mensuelle moyenne dans la région de Touggourt.

4.2.3. Température de El-oued

La Figure 1-29 montre les variations de la température moyenne dans la région d'El-Oued. Les températures sont particulièrement élevées en été, avec une moyenne des mois les plus chauds (juillet et août) dépassant 32 °C, tandis que celle du mois le plus froid (janvier) est inférieure à 11,5 °C (Meteoblue).

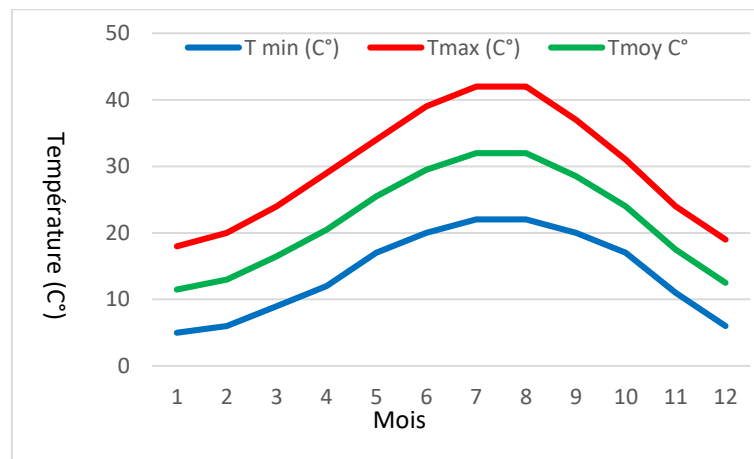


Figure 1-29 Température mensuelle moyenne dans la région de El-oued.

4.3. Model et courbes d'irradiation solaire

4.3.1. Le gisement solaire

Il s'agit de l'ensemble des données sur l'évolution de l'irradiation solaire disponibles sur une période déterminée. Nous utilisons ces données pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et réaliser un dimensionnement aussi précis que possible en tenant compte de la demande à satisfaire. La carte de l'ensoleillement mondial est présentée dans la Figure 1-30.

En raison de sa situation géographique, l'Algérie bénéficie d'un potentiel solaire très important, comme l'illustre la Figure 1-31. (Oudrane, 2018).

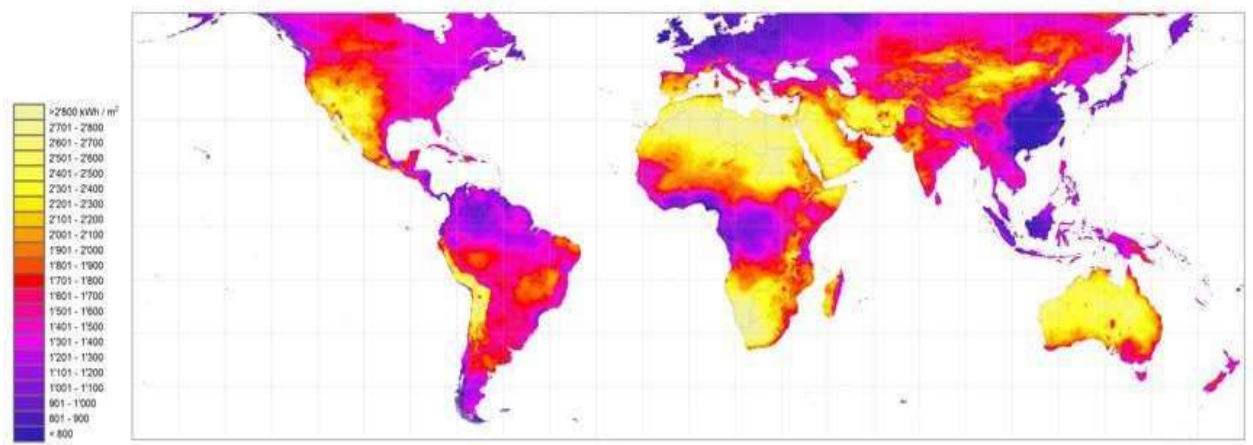
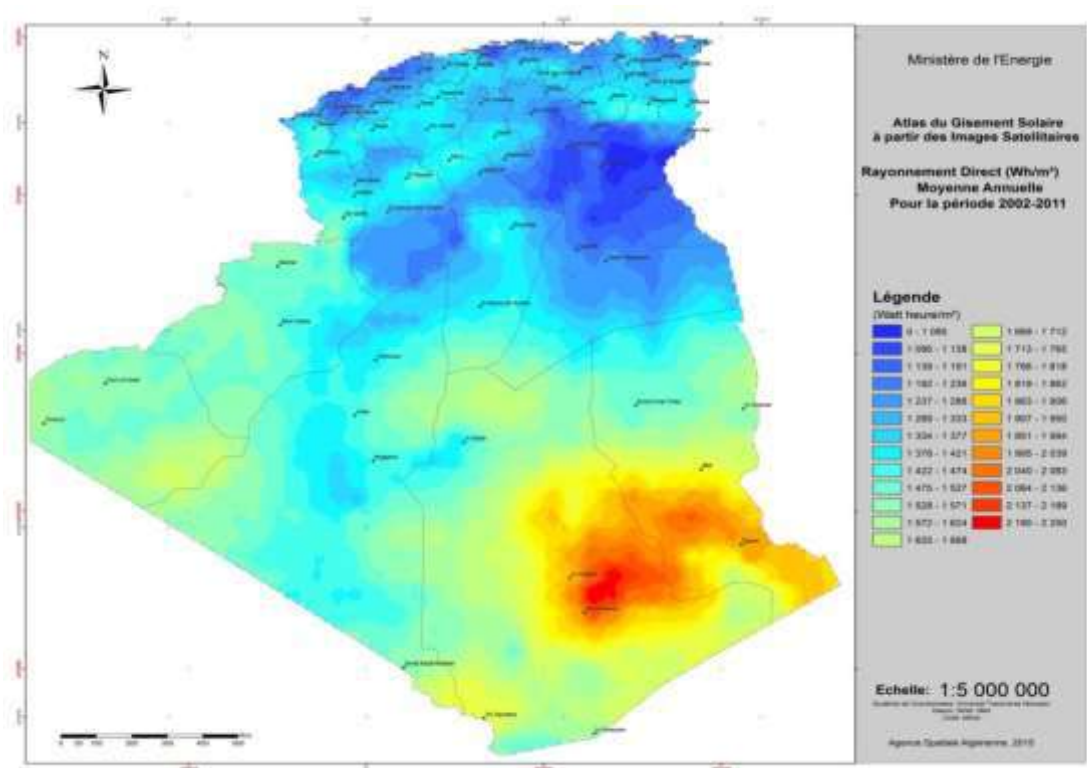


Figure 1-30 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel. (Ecosolaire).



L'énergie solaire installée sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestiques représente 0,25 Gtep (2 900 TWh).

La géothermie des profondeurs atteint une capacité de 0,2 Gtep, ce qui équivaut à 2300 TWh.

Le tableau 1.1 présente le potentiel solaire par région climatique en Algérie, en fonction de l'ensoleillement annuel reçu. (Meteoblue).

Tableau 1-1 Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique (Oudrane, 2018).

Régions	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4.0	10.0	86.0
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kwh/m ² .an)	1700	1900	2650

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les habitats traditionnels de nos régions et exploré diverses stratégies de conception pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Les stratégies actives englobent généralement des systèmes de chauffage et de refroidissement, tandis que les approches passives incluent des éléments tels que l'orientation du bâtiment, l'étanchéité à l'air, une isolation continue, l'utilisation de fenêtres adaptées à l'éclairage naturel, ainsi que la conception favorisant la ventilation naturelle. Dans notre étude, nous mettons l'accent sur les techniques traditionnelles de conception passive, telles que les coupoles, le Sabat, ainsi que la construction souterraine et semi-souterraine. Nous prenons également en compte le choix de matériaux de construction régionaux présentant une efficacité thermique appropriée et des épaisseurs de murs optimales.

Chapitre 2 Conception générale du plan de la résidence

1. Introduction

Après l'étude sociologique et l'habitat traditionnel dans le premier chapitre, le but de ce chapitre est de présenter le moyen de minimiser la consommation énergétique pendant la période d'été, par l'intégration de la géothermie. Ainsi, nous devons maintenir quelques caractéristiques de construction traditionnelle « Sguifa » (SABAT) et « Gouba ». Ces constructions traditionnelles jouent un rôle important dans la conception des bâtiments dans le sud et peuvent être utilisées, en particulier, le matin et le soir pendant la période de fortes chaleurs.

Ensuite, nous réalisons la conception générale du plan d'une résidence, par l'intégration d'un local semi-souterrain, dans une région chaude, au sud de l'Algérie et enfin, le choix des plans architecturaux de la résidence proposée.

2. La géothermie dans le confort du bâtiment

La géothermie peut être appliquée dans le confort du bâtiment, à travers deux types : La géothermie directe, par l'utilisation de locaux semi-souterrains et la géothermie indirecte, par le biais des puits canadiens (échangeur de chaleur air-sol).

2.1. Géothermie directe (semi-souterrain)

Ce type d'application est présenté en détail, dans ce chapitre, à travers la conception générale du plan de la résidence, par l'intégration d'un local semi-souterrain, situé dans la ville de Metlili, dans la Wilaya de Ghardaïa (Algérie). Cette région se caractérise par un sol rocheux qui permet la solidité de la structure et l'absence de la montée des eaux des nappes superficielles.

2.2. Géothermie indirecte

2.2.1 Échangeur de chaleur air-sol

Durant la période estivale, de fortes chaleurs, la température ambiante atteint un niveau élevé, où parfois le record mondial de température la plus élevée, dans les zones arides, est atteint. Dans des conditions difficiles, les systèmes de refroidissement passifs s'avèrent indispensables, en raison de leur consommation énergétique très faible comparée à celle des systèmes actifs. Parmi ces dispositifs, l'échangeur de chaleur air-sol se distingue par ses

avantages notables, en raison de son potentiel à fournir une grande capacité de refroidissement à faible coût.

2.2.2 Description du système d'échangeur de chaleur air-sol

Principalement, le système est utilisé pour rafraîchir et chauffer les bâtiments. Il se compose d'un ou plusieurs tuyaux souterrains, généralement en PVC (chlorure de polyvinyle). Le flux d'air traverse le tuyau et amène l'énergie géothermique vers le bâtiment. La conduite est équipée d'une soufflante centrifuge pour renforcer la vitesse d'écoulement et pallier les pertes de charge (Figure 2-1). Le ventilateur est placé au début du tuyau mais, pour certains petits systèmes, il peut être installé à l'extrémité du tuyau. Une petite condensation d'eau se produit dans la canalisation qui descend grâce à une légère pente de canalisation. Nonobstant l'inconvénient de l'encombrement de l'installation, ce système est préféré pour les maisons isolées dans les zones rurales, où il y a suffisamment d'espace.

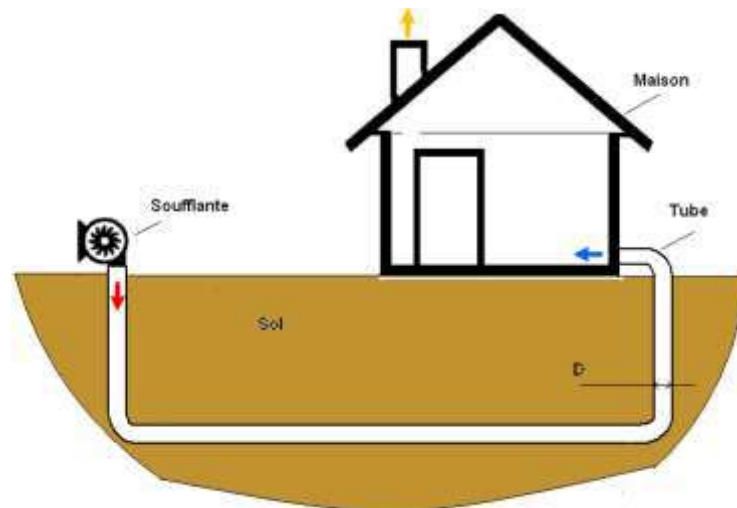


Figure 2-1 Schéma du système d'échangeur air-sol.

3. Présentation de la région d'étude

3.1. Situation géographique

La Daïra de Metlili se situe au sud de la wilaya de Ghardaïa, à 45 km de son chef-lieu (voir Figure 2-2). S'étendant sur une superficie de 7300 km², elle est localisée aux coordonnées suivantes :

Latitude : 32° 16' Nord, Longitude : 3° 38' Est, Altitude : 455 m

Elle est délimitée au nord par la wilaya d'El Bayadh ainsi que par les communes de Daya, Bounoura, El Atteuf et Zelfana ; au sud par la commune de Sebseb ; à l'est par la wilaya de Ouargla ; et à l'ouest par la wilaya d'El Bayadh.

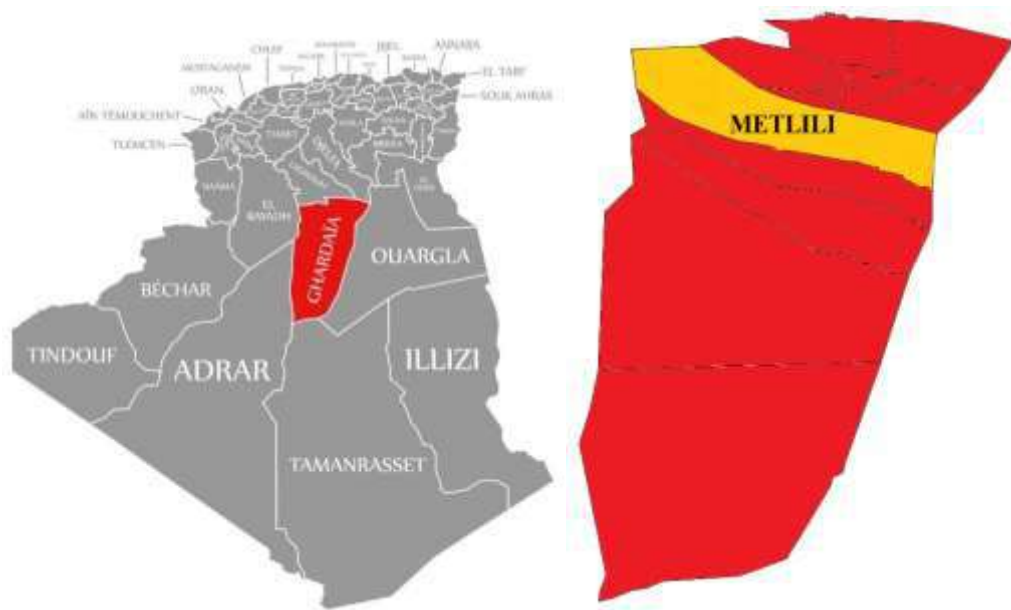


Figure 2-2 Situation géographique de la Daïra de METLILI.

3.2. Analyse des paramètres climatiques et de la région

La température

La température ambiante de la région est un paramètre clé qui influence de manière significative les besoins énergétiques des bâtiments. La Figure 2-3 présente les températures moyennes mensuelles enregistrées tout au long de l'année dans la ville de Metlili.

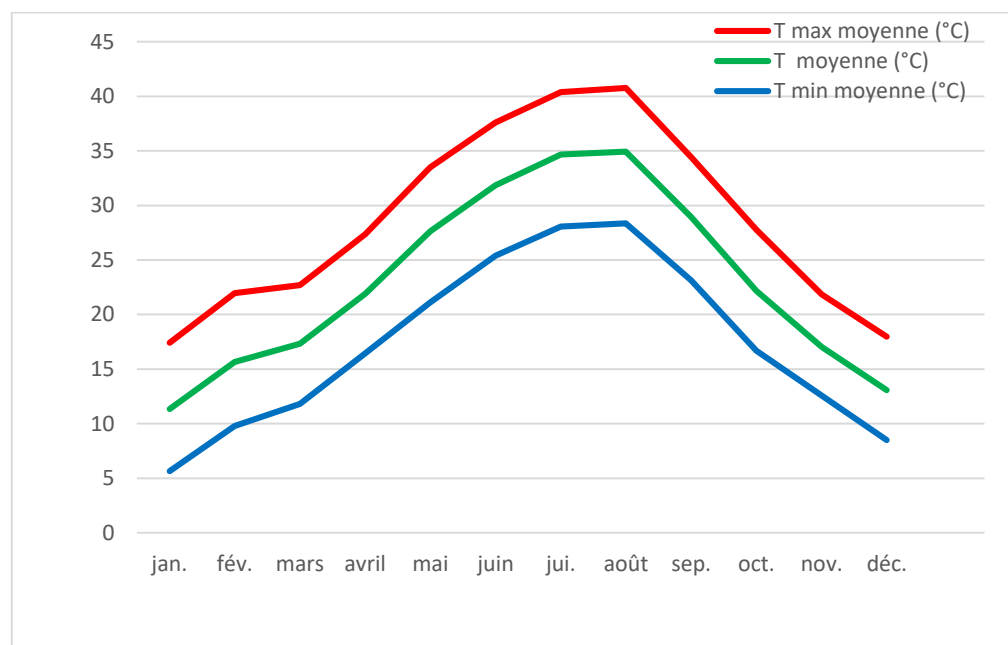


Figure 2-3 Température mensuelle de METLILI (Weather underground).

La température moyenne minimale atteint, en janvier, la valeur de 5.65°C , La température moyenne maximale, en juillet et août, atteint la valeur supérieure de 40°C , le max de température moyenne est atteint, en août, avec une valeur de 34.92°C .

3.3. Plan et structure d'une maison à METLILI

La région de Ghardaïa est une région rocheuse du sud algérien, elle est connue par ses résidences traditionnelles. En général, les résidences de la commune de Metlili contiennent des locaux semi-souterrains, sous forme de chambre, comme indiqué dans la Figure 2-4.

La Figure 2-4 illustre la conception et les dimensions de la chambre semi-souterraine qui fera l'objet d'une simulation numérique par un logiciel CFD, qui traite les écoulements des fluides.

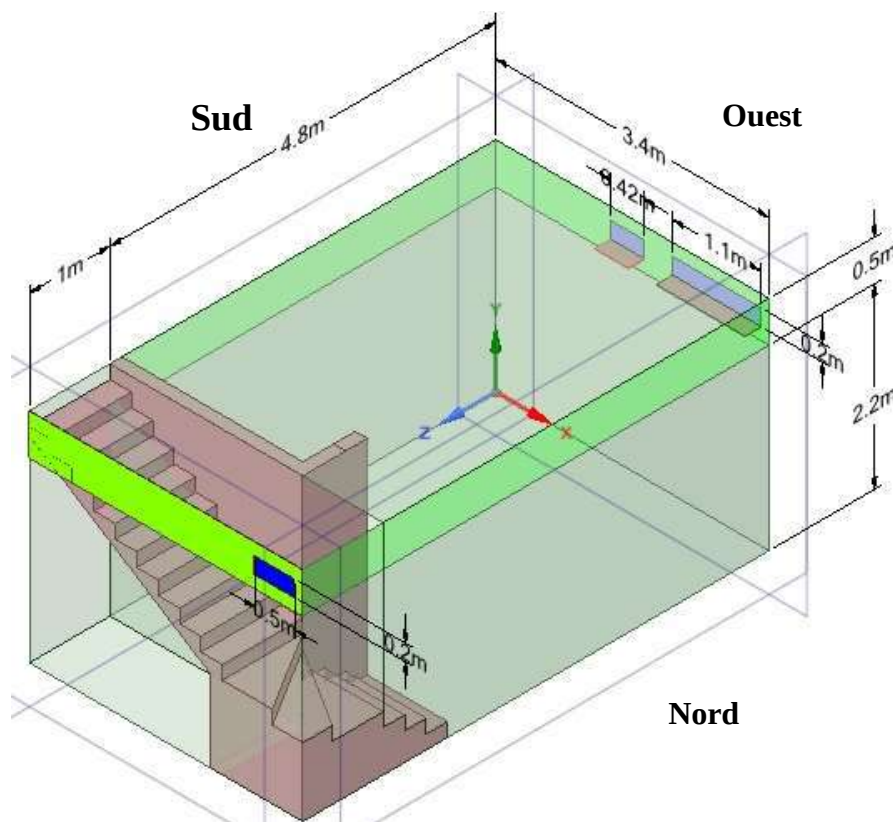


Figure 2-4 Dimensions de la chambre semi-souterraine.

La chambre semi-souterraine, que nous avons choisie, est caractérisée par les dimensions suivantes :

- La hauteur de 2,7 m ;
- La longueur de 4,8 m ;
- La largeur de 3,4 m.

La plus grande partie de la hauteur de la chambre semi-souterraine est enterrée dans le sol. Seul 0,5 m reste au-dessus du niveau du sol (Figure 2-4), ce qui permet d'installer de petites fenêtres. Les fenêtres de 0,2 m de hauteur assurent la lumière et l'aération avec différents taux, selon le jour et la nuit.

La vue extérieure des fenêtres de sortie d'air, qui s'ouvre à l'air ambiant dans le garage, est illustrée par la Figure 2-5-a et la vue intérieure de ces fenêtres est illustrée par Figure 2-5-b.

Outre ces petites fenêtres, à la deuxième entrée, une porte relie la maison par un couloir de 150 cm de largeur. L'espace souterrain de ce couloir sera utilisé (plus tard dans les propositions), pour agrandir la chambre semi-souterraine et modifier les escaliers.

L'accès à la chambre est assuré par un ensemble d'escaliers construits à l'intérieur d'un hall séparé (Figure 2-5-c).

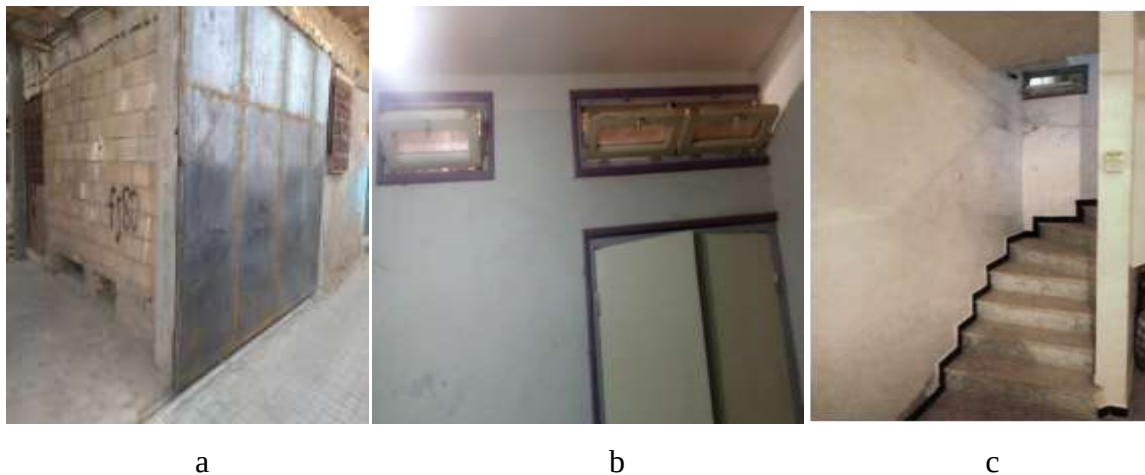


Figure 2-5 Résidence avec local semi-souterrain à Metlili .

Au bout de l'escalier, une large ouverture donne sur l'entrée de la chambre.

En été, selon les traditions sociales, cette chambre est principalement réservée aux activités et au sommeil durant les journées chaudes (de 11h à 17h).

Elle se caractérise par une température modérée qui ne dépasse pas 33°C pendant la journée, contre 48°C en température extérieure maximale, faisant en sorte que le climatiseur n'est pas nécessaire et un seul ventilateur suffit pour la ventilation.

À Metlili, en général, les maisons traditionnelles sont composées de trois étages : Le semi-souterrain, le premier étage et le deuxième étage sans toit.

4. Choix des plans architecturaux de la résidence

Le projet architectural est la planification d'une construction de grande envergure, ayant un intérêt architectural, où la construction future est élaborée sur la base de nouvelles techniques de construction sans négliger les anciennes et les traditionnelles.

4.1. Critères de choix

Pour construire une maison à faible consommation d'énergie, il est indispensable de prendre en compte les considérations suivantes :

Les éléments composant la famille pour déterminer le nombre de chambres et la surface de la maison ;

Un espace vert ombré, situé dans la partie ouest de la maison, devant être occupé le soir à partir de 16 h, durant la période estivale ;

Une zone, située dans le centre de la maison, contenant un dôme. Cette zone est utilisée durant la matinée car elle est ouverte sur la face nord et protégée contre les rayons solaires ;

Une chambre semi-souterraine pour la sieste, surtout durant l'été ;

Deux cours dédiées au sommeil durant les nuits estivales ;

Une fenêtre pour chaque chambre servant à l'aération ;

Une partie du toit devant être de forme triangulaire, permettant de minimiser les approches solaires directes et de supporter les panneaux photovoltaïques avec un angle d'inclinaison convenable.

5. Description du local semi-souterrain

5.1. Rôle du local semi-souterrain

La construction souterraine et semi-souterraine est un type de bâtiment dont les traces se perdent dans le passé. De la Cappadoce à la Jordanie, l'homme nous a laissé d'innombrables témoignages de villes creusées qui, aujourd'hui, répondent plus adéquatement aux problèmes climatiques. Il est surprenant de voir comment un type de bâtiment, qui a ses racines dans un passé lointain, est aujourd'hui capable de satisfaire les besoins d'économie d'énergie et de formes architecturales en constante évolution (Lembo et al., 2011).

L'homme a découvert que vivre sous terre permettait de se protéger du vent et de la neige. La maison enterrée peut se présenter sous deux techniques dominantes : Soit, elle est complètement souterraine et seuls quelques dômes ou ouvertures de lumière dépassent de la terre. Soit, elle est semi-souterraine et profite de la pente naturelle du terrain pour garder une partie ouverte vers l'extérieur, le plus souvent en plein sud, pour bénéficier des apports du soleil (Build-green).

5.2. Plan et dimensions

Afin d'optimiser les performances de refroidissement de la chambre de résidence à METLILI, notre choix est d'apporter quelques modifications simples à la conception traditionnelle de la chambre, sans affecter la structure générale de la maison. Cette modification

est illustrée dans la Figure 2-6. Pour étudier la forme de celle-ci, on a calculé le facteur de compacité (coefficient de forme).

Le facteur de compacité ou, coefficient de forme, représente le rapport entre la surface totale de l'enveloppe et le volume habitable d'un bâtiment (m^2/m^3). Les pertes de chaleur, liées aux écarts de température entre un intérieur thermiquement stable et un environnement extérieur fluctuant, se produisent principalement par conduction au niveau de l'enveloppe du bâtiment. Pour réduire ce ratio, l'objectif est de minimiser la surface exposée aux déperditions tout en maximisant le volume habitable. (Saifi, 2015).

$$Cf = \frac{Se}{V} \quad 2.1$$

Se : Surface de l'enveloppe (m^2)

V : Volume habitable (m^3)

Cf : Coefficient de forme (m^{-1})

Pour calculer le Coefficient de forme de la chambre traditionnelle (Figure 2-5) :

$$Se = 78.38 \text{ m}^2 \quad V = 48 \text{ m}^3 \quad Cf = 1.633 \text{ m}^{-1}$$

Et pour la chambre proposée (Figure 2-6)

$$Se = 118.26 \text{ m}^2 \quad V = 85.68 \text{ m}^3 \quad Cf = 1.38 \text{ m}^{-1}$$

L'objectif est toujours d'augmenter le volume par rapport à la surface pour diminuer le facteur de forme. Dans ce cas, la diminution est effectuée par une différence de 0.25 m^{-1} .

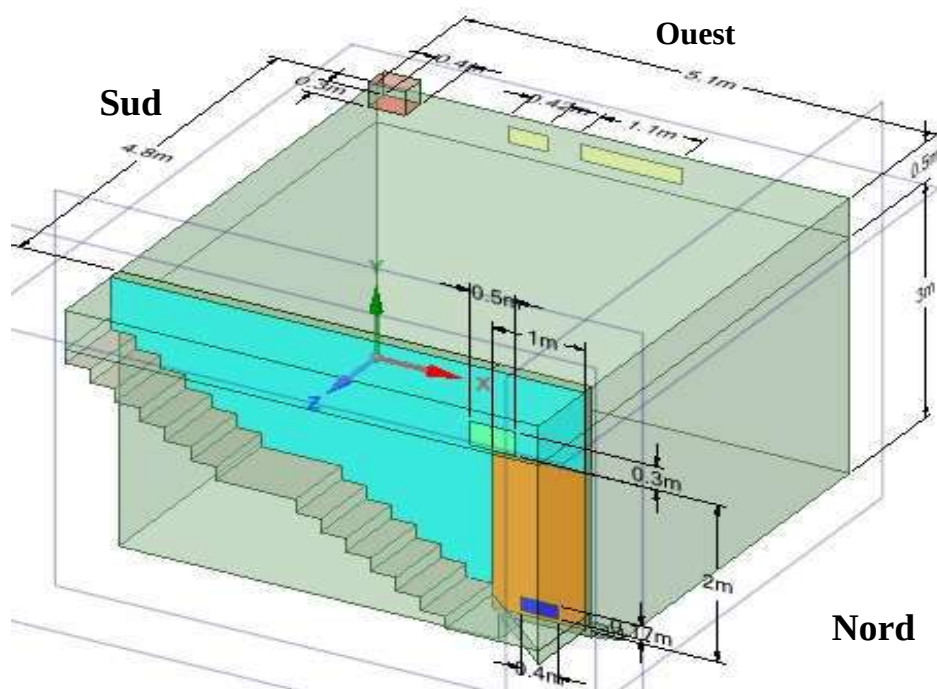


Figure 2-6 Forme et dimensions du local traditionnel.

La largeur d'origine de la pièce (3,4 m) est prolongée d'une distance de 170 cm. Cette cavité est creusée sous le couloir qui est la deuxième entrée de la maison, via le garage. Cette extension permet la construction de nouveaux escaliers de résistance pour une plus grande profondeur de la chambre semi-souterraine.

Le niveau du sol du couloir sera augmenté de 0,5 m afin d'obtenir le même niveau de toit pour la chambre. La profondeur d'origine de la chambre semi-souterraine (2,2 m) sera prolongée dans le sol de 0,8 m. De plus, la chambre proposée est conçue avec une cavité séparée contenant les escaliers, où, en bas, une porte en bois est ajoutée comme entrée de la chambre. L'endroit le plus approprié pour l'ouverture de l'entrée d'air est choisi au seuil de la porte (Figure 2-6).

L'évacuation de l'air chaud est faite par une ouverture de sortie, située sur le toit de la chambre, près du coin sud-ouest (comme dans la Figure ci-dessus). Cette sortie d'air est ouverte sur le premier étage de la maison, où la température est relativement inférieure à la température ambiante.

Comme pour la chambre traditionnelle, la partie haute de la nouvelle chambre (0,5 m) est au-dessus du niveau du sol, ce qui permet à la fenêtre, côté Ouest, de contribuer à l'éclairage de la chambre. Ces fenêtres seront renforcées par des portes extérieures en double vitrage pour réduire les infiltrations de chaleur. Les fenêtres peuvent être ouvertes la nuit pour permettre une aération libre de la chambre.

Nous utiliserons cette modification avec la conservation de la structure d'origine de la chambre à Metlili, pour une nouvelle maison autonome utilisant l'énergie passive.

La Figure 2-7 illustre le local semi-souterrain dans la maison.

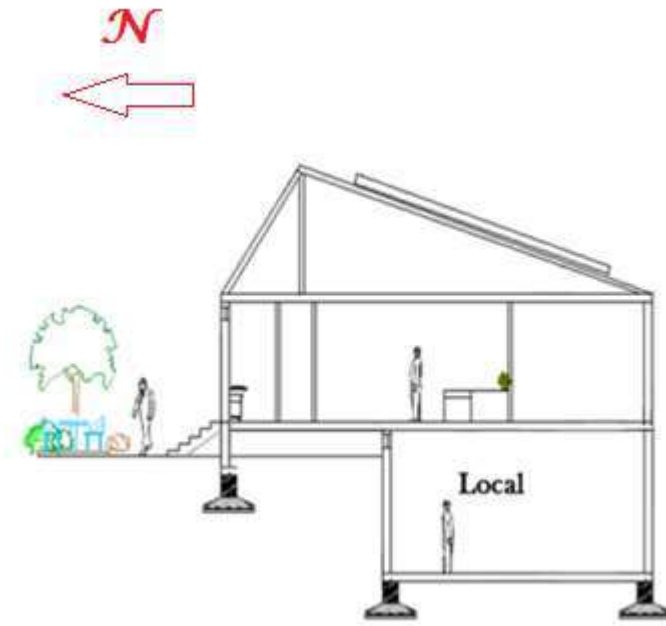


Figure 2-7 Local semi-souterrain

6. Description géométrique du premier étage

6.1. Role et exploitation

Le nombre moyen des membres de la famille est de 07 personnes. Donc, la maison se compose de plusieurs pièces, dont deux 2 chambres, une salle pour les invités, un local sous terre, afin d'y séjourner au moment de la sieste, un entrepôt, une salle de bain et une cuisine.

La superficie de la maison est de (12×11 m), avec une hauteur de mur de 3,2 m et une paroi de fond de 3,8 m. La superficie totale des murs est de (19 x 22 m).

Deux cours de la maison sont utilisées pour dormir pendant les nuits estivales, La hauteur du mur de la cour est de 2 m. Le dôme est au centre de la maison et ouvert vers le Nord. Il est utilisé pour y passer la matinée jusqu'à 11h00.

6.2. Plan et dimensionnement

La maison qu'on veut construire prendra la forme de la lettre U, au milieu duquel, il y a une coupole. Cette maison est orientée vers le Nord.

La Figure 2-8 illustre le plan architectural de résidence pour le premier étage.

6.3 Forme du toit de la maison

Le toit est construit sous forme triangulaire, la plus grande partie est inclinée de $32,16^\circ$ (latitude de Metlili) vers le Sud et est utilisée comme support pour les panneaux solaires photovoltaïques (Figure 2-9).

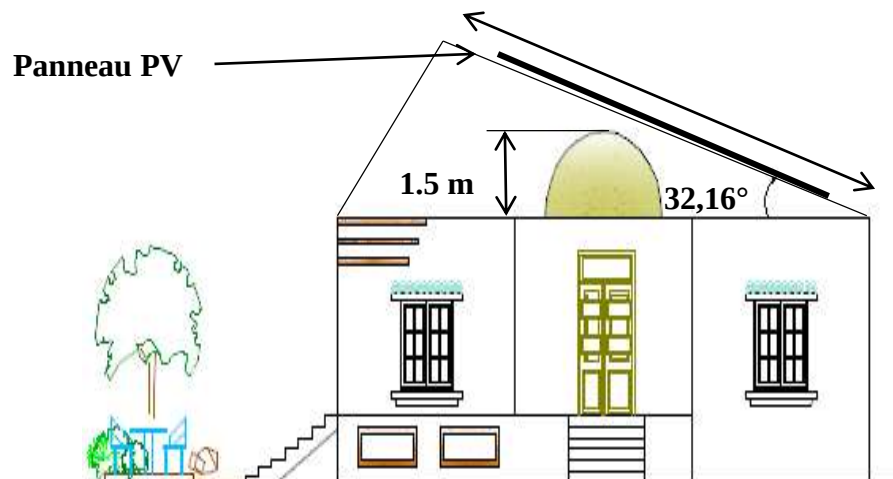


Figure 2-9 La forme du toit à l'avant.

L'autre partie du toit est plus petite. La partie avant a une forme normale, où le dôme (coupole) comporte une hauteur de 1.5 m et une longueur de 3 m pour refléter la plus grande quantité possible de rayonnements solaires, la Figure 2-10.

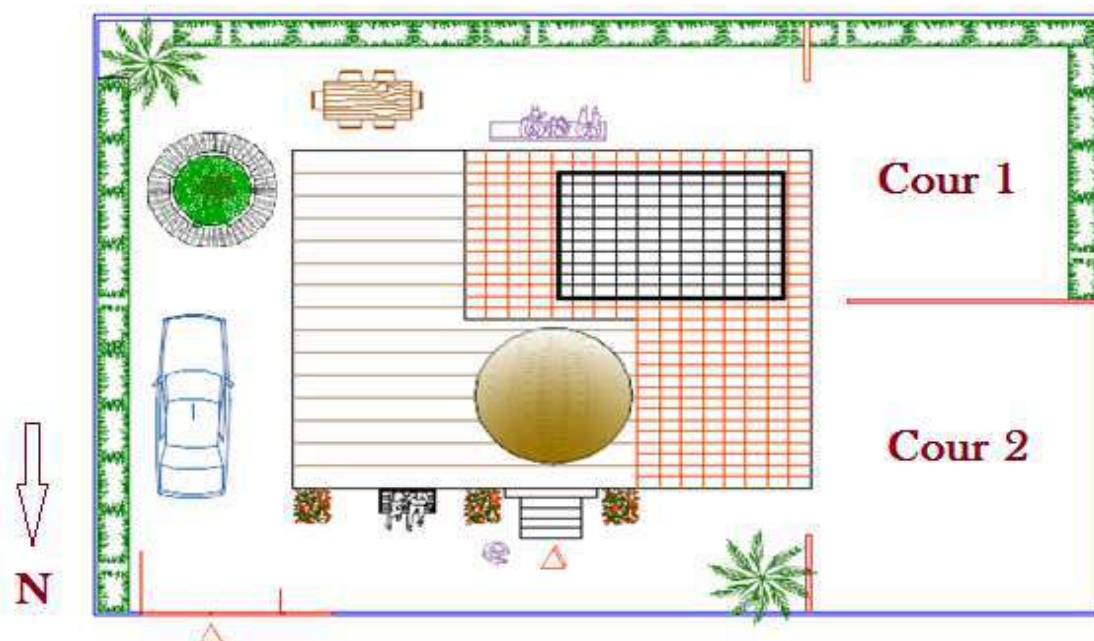


Figure 2-10 Forme du toit de la partie supérieure.

6.4 Epaisseur des murs

Les murs extérieurs de la maison, qui sont composés de deux briques de (10 cm), sont séparés par un isolant d'air d'une épaisseur de 4 cm.

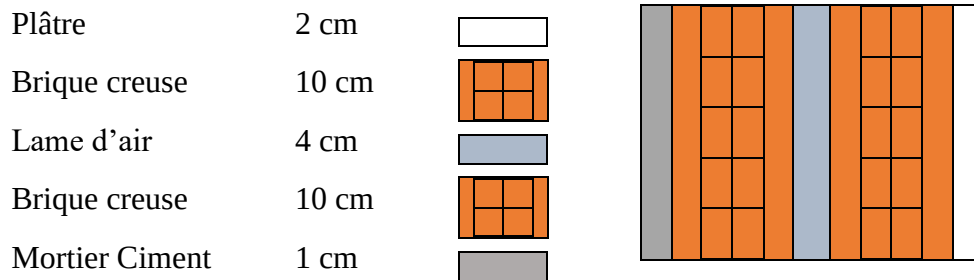


Figure 2-11 La forme du mur extérieur.

Les murs intérieurs de la maison, qui séparent les chambres, sont construits avec des briques d'une épaisseur de 15 cm. Ces murs sont revêtus de plâtre. La cuisine et la salle de bain sont revêtues en ciment pour les protéger contre l'humidité.

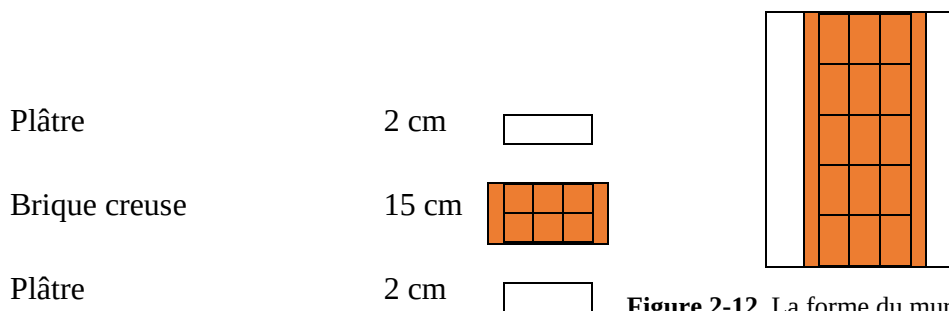


Figure 2-12 La forme du mur intérieur.

7. Aspect énergétique global

Pour faire des statistiques fiables, il est recommandé de faire un audit énergétique qui se penche sur la performance énergétique des bâtiments. Généralement, il s'obtient avec des niveaux de difficulté et de précisions variables. L'audit énergétique, allant du simple relevé sur le site à l'étude générale, se fait en plusieurs phases (Brouns, 2015).

Ce diagnostic vise à évaluer et à optimiser la performance énergétique du bâtiment. L'objectif est d'identifier les aspects pouvant être améliorés pour réduire les besoins énergétiques et renforcer l'efficacité thermique de la structure: par la planification et la mise en place de travaux ou par une méthode numérique, via l'installation d'un système d'analyse et de mesure de données énergétiques (Ainurzaman et al., 2013).

7.1. Consommation énergétique en Algérie

En Algérie, les consommations énergétiques sont réparties sur trois secteurs principaux : L'industrie et le BTP (bâtiment et travaux publics), le transport et les ménages et autres. En 2019, les consommations finales de ces secteurs sont respectivement de 11.4 MTep, 15.4 MTep et 23.5 MTep (Ministère de l'énergie, 2020).

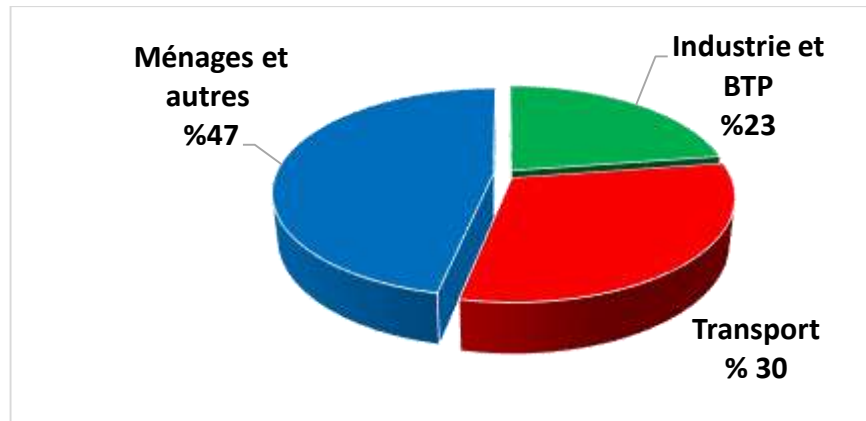


Figure 2-13 Consommation énergétique finale nationale, par secteur (Ministère de l'énergie, 2020).

La Figure 2-13 montre que le secteur des ménages et autres enregistre la consommation la plus élevée avec 47% en 2019.

Le taux de consommation élevé, dans le secteur des ménages, oblige les décideurs à donner une priorité à ce secteur dans l'élaboration de la stratégie et des programmes de maîtrise d'énergie.

7.2. Consommation d'énergie dans une résidence au sud de l'Algérie

Au cours de l'année, on constate que le refroidissement des bâtiments constitue le consommateur principal d'énergie. La Figure 2-14 présente, ci-après, les différentes consommations d'une maison conventionnelle, située au sud algérien.

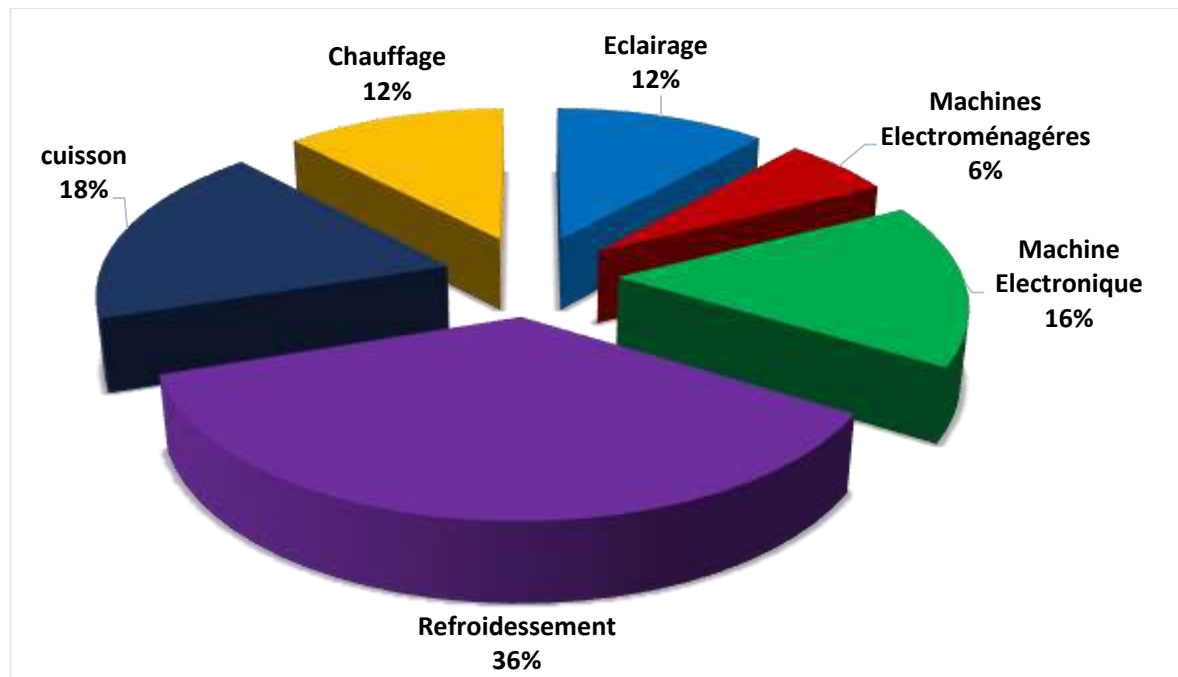


Figure 2-14 Consommation annuelle d'électricité d'une maison au sud de l'Algérie

(Djelloul et Moummi, 2013).

Bien que nous n'utilisions le refroidissement qu'en été, le problème reste au niveau du refroidissement des résidences car nous avons une consommation électrique élevée et par conséquent une lourde facture d'électricité. Cela nous amène à revoir la conception du bâtiment et l'intégration des énergies renouvelables.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé une étude de conception de résidence, comprenant un local semi-souterrain et plusieurs pièces au premier étage. L'approche est basée sur la réduction de la consommation énergétique pendant la période d'été. L'exploitation des constructions traditionnelle « Sguifa » (SABAT) et « Gouba » contribue à l'abaissement des pics de fortes chaleurs. Ainsi, la bonne maîtrise et la gestion optimale des ressources énergétiques permettent de satisfaire le besoin des consommations. En plus, il est nécessaire de prévoir et d'évaluer les données énergétiques de la résidence, en concordance avec les statiques climatiques de la région concernée.

Chapitre 3 Simulation du comportement thermique du local semi-souterrain

1. Introduction

Dans ce chapitre, une simulation numérique est effectuée sur le local semi-souterrain traditionnel existant et le local modifié proposé. Nous commençons par une présentation du logiciel de simulation ANSYS CFD, en détaillant les équations qui déterminent les conditions aux limites. Pour valider le modèle, les résultats obtenus, sous forme de contours de température, sont comparés aux mesures relevées dans le local semi-souterrain d'origine.

2. L'outil de simulation ANSYS CFD

Ansys Mechanical est un logiciel performant permettant de résoudre des problèmes complexes en ingénierie structurelle et d'optimiser les décisions de conception de manière plus efficace et rapide. Cet outil dynamique offre une suite complète d'outils d'analyse pour évaluer divers aspects structurels, facilitant ainsi les choix de conception (ANSYS, 2021).

2.1. Brève description

La dynamique des fluides computationnelle (CFD) est la discipline qui permet de prédire l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur et de masse, les réactions chimiques, ainsi que d'autres phénomènes connexes. Elle repose sur la résolution numérique des équations mathématiques fondamentales qui régissent ces processus, telles que la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie. Les solveurs ANSYS CFD utilisent la méthode des volumes finis pour effectuer ces analyses (ANSYS, 2010).

2.2. Présentation de la modélisation CFD

La modélisation CFD dans ANSYS est basée sur quatre parties principales, divisées en huit étapes (ANSYS, 2010).

a- Identification du problème

- 1- Définir des objectifs
- 2- Identifier le domaine

b- Prétraitement

- 3- Géométrie
- 4- Maille

5- Physique

6- Paramètres du solveur

c- Résoudre

7- Solution de calcul

d- Post-traitement

8- Examiner les résultats

3. Analyse bibliographique

Dans les maisons traditionnelles et les constructions bioclimatiques, la ventilation naturelle est une technique courante pour réduire la température. De nouvelles techniques sont utilisées telles que la couverture végétale, les matériaux à changement de phase, la ventilation par cheminée solaire, le tube d'échange terre-air et la construction souterraine. Ces deux dernières méthodes sont très intéressantes, en particulier pour refroidir les bâtiments à un seul étage qui dépendent fortement des flux thermiques externes du rayonnement solaire direct.

En particulier, pour les résidences isolées, où l'alimentation électrique, par un générateur à combustible, est très coûteuse et les panneaux photovoltaïques nécessitent une bonne rationalisation et Bonne connaissance de la gestion de l'énergie. Les types de bâtiments souterrains sont utilisés dans l'ancienne civilisation comme en Cappadoce et en Jordanie, où l'homme nous a laissé des témoignages de villes creusées.

Aussi, dans le sud de l'Algérie, certains bâtiments traditionnels ont été creusés dans les bosses et les plateaux au cours des siècles passés. Leurs architectures répondent plus adéquatement aux problèmes climatiques et aux économies d'énergie. Notant que Chennouf et al., 2013, ont indiqué que le sol souterrain du sud de l'Algérie est caractérisé par une température modérément stable pendant toute l'année. Dans la littérature, certains travaux ont analysé ces types de caractéristiques de construction, en fonction de l'emplacement géographique, du climat et de l'acceptabilité humaine. Lembo et al., 2011, ont étudié un bâtiment semi-souterrain partiellement enterré, le long du front nord, en utilisant la pente du site. Le rayonnement thermique atteint la serre et se transforme en chaleur par des conduits de ventilation. La vitre extérieure est inclinée à 10 ° pour se protéger du soleil d'été mais laisse pénétrer le soleil d'hiver. Les événements, en bas et en haut du verre, sont ouverts vers le système de ventilation. Les toits des bâtiments fonctionnent comme des « jardins sur les toits ». Derradji et Aiche, 2014, ont étudié le couplage des cheminées solaires avec des conduits de refroidissement enterrés, comme conception pour le refroidissement dans les climats chauds. La densité du sol est estimée pour le potentiel de refroidissement des bâtiments. Les résultats indiquent que si l'irrigation est

appliquée à la surface du sol en été, le sol offre une bonne source de refroidissement pour les bâtiments. On note une diminution de la température à 18°C entre la température du sol(1m de profondeur) et la température extérieure ambiante. Delmastro et al., 2016, ont expliqué que la relation coût/bénéfice, entre l'utilisation souterraine et l'utilisation d'énergie par l'utilisation de l'espace souterrain, pourrait contribuer à améliorer la qualité des services énergétiques. Dans une telle approche d'urbanisme souterrain, la nécessité de plans directeurs intégrés à long terme, proposant des lignes directrices appropriées, est mise en évidence. Mukhtar et al., 2018, ont tenté d'analyser les performances thermiques d'un abri souterrain à ventilation naturelle dans un pays chaud et humide comme la Malaisie. Une conception optimale est proposée, la température ambiante de l'abri était nettement inférieure à la température extérieure pendant le mois le plus chaud. La conception optimale a montré une augmentation d'environ 3,4% du taux de ventilation et une diminution d'environ 2,8% de la température ambiante, par rapport à la conception précédente.

Chen et al., 2007, ont étudié le mausolée de l'empereur Yang de la dynastie Han et la première salle de protection et d'exposition de reliques, entièrement souterraine, de Chine. Ils discutent de la préservation des vestiges historiques, de la relation harmonieuse entre l'architecture et la nature. Les ratios d'économie d'énergie de l'architecture souterraine par rapport à l'architecture au sol sont les suivants : Architecture de service 60% ; Entrepôt 70% ; Et les structures souterraines semi-mises à la terre 69%. Van Dronkelaar et al., 2014, ont étudié le potentiel de réduction de la demande d'énergie de refroidissement et de chauffage pour les bâtiments souterrains, par rapport aux l'autre hors sol. La réduction d'énergie est réalisable pour tous les climats et fonctions, dans les bâtiments souterrains et hors sol mais l'ampleur est liée aux différents éléments de conception. Ils notent que 11% des cas analysés peuvent être considérés comme des bâtiments proches de zéro énergie (demande énergétique inférieure à 10 kWh/m²/ an). Jiao et al., 2017, ont analysé la relation entre l'efficacité de la climatisation et l'efficacité énergétique correspondante. Des simulations CFD énergétiques sont conduites dans les centres de données souterrains de climatisation sous les tropiques. L'analyse concerne la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique de l'ensemble du système de climatisation et le schéma de flux d'air correspondant. L'optimisation de la gestion de l'air montre que l'énergie des ventilateurs peut être économisée de 20% à 25%. Li et al., 2017, ont réalisé des enquêtes comparatives de confort thermique, y compris des mesures sur le terrain, où des questionnaires ont été menés dans un sous-sol souterrain de défense aérienne différent. Sur la base du graphique psychométrique, les plages de température recommandées pour différentes villes, par

rapport aux plages de température d'origine, montrent que les plages de température recommandées, variant avec la température du sol, pourraient économiser beaucoup de consommation d'énergie. Shan et al., 2017, ont étudié les risques critiques dans la construction de projets de bâtiments résidentiels souterrains. Les résultats de l'enquête, par questionnaires, ont montré que le « gain de place » était l'avantage le plus significatif, suivi par « un confort thermique intérieur amélioré », « plus résistant aux bruits extérieurs ». En outre, les résultats ont révélé que « l'accès limité à la lumière naturelle » était le désavantage le plus grave, suivi par « le coût de construction élevé » et « la résistance psychologique des résidents ». Alkaff et al., 2016, ont déduit un modèle graphique de bâtiments à l'abri de la terre, en visualisant leurs principaux aspects, tels que la conception, la performance thermique et le développement durable.

Le bâtiment est creusé dans le versant de la montagne, le toit et les trois côtés sont recouverts de roches et seul le côté sud est exposé au soleil. Le coût de conception supplémentaire peut être compensé en omettant le coût de l'installation de la climatisation, de la peinture murale externe et des fondations inférieures attendues. Kajtar et al., 2015, ont dimensionné les espaces souterrains, en termes de transfert de chaleur et confort thermique, et ont développé un modèle physique et mathématique dynamique. Les résultats de simulation obtenus sont présentés sous forme de schémas en faveur du dimensionnement rapide des performances de chauffage et de refroidissement requises. Les schémas présentés peuvent être utilisés de manière efficace, également, pour le calcul du confort thermique. Ghedamsi et al., 2014, ont étudié un système de refroidissement, utilisant des matériaux à changement de phase (MCP), pour absorber le gain de chaleur externe du rayonnement solaire à travers les murs de bâtiments, dans la ville de Ouargla (Algérie). Mais la réduction de la température intérieure peut atteindre une température moyenne maximale de 8°C par rapport à la température extérieure. Dokkar et al., 2013, ont présenté un système de refroidissement passif, incorporant Système de cheminée solaire et d'échangeur de chaleur air-sol, pour refroidir un abri de télécommunication dans un climat désertique. Ils montrent que ce système de refroidissement nécessite un faible coût et qu'il est écologique. La température au milieu de l'abri ne dépasse pas 29°C.

Netam et al., 2019, ont étudié le confort thermique des maisons, de groupe à faible revenu, par des techniques de refroidissement passif comme l'enveloppe verte, le mur ombragé et la ventilation. Au début de la journée d'été, la température extérieure est plus basse ce qui peut réduire la température intérieure mais elle reste insuffisante pour atteindre un confort

thermique. Verma et al., 2020, ont mené une revue sur le système d'échangeur de chaleur à conduites d'air et de terre (EAPHE). Ils montrent que la profondeur du tuyau inférieure à 4 mètres et l'augmentation de vitesse d'air réduisent les performances thermiques du système. De plus, pour parvenir à une optimisation du fonctionnement de l'EAPHE, le système doit être couplé à d'autres systèmes, tels que des panneaux photovoltaïques, une éolienne et un panier solaire. Anthony et Verma, 2021, ont simulé une pièce chauffée pour évaluer le confort thermique sous convection naturelle de l'air. Les résultats montrent que la température intérieure se situe entre 20°C et 22°C, ce qui présente une température confortable pour les jours d'hiver.

Beigli et Ienci, 2016, ont décrit et analysé le principe des conceptions architecturales, d'un bâtiment souterrain et semi-souterrain, utilisé pour surmonter le climat dur dans différents sites secs et chauds en Iran. Les trois cas choisis (Shabestan, Shavadan et jardin en contrebas) sont analysés pour montrer l'architecture écologique (ou architecture durable) mais l'étude se limite à l'aspect descriptif et à la mesure de la température. Cette étude ne contient aucune simulation du flux d'air, pour montrer clairement l'interaction et l'impact de la conception du bâtiment et du confort thermique. De nombreux travaux récents sont réalisés mais ils traitent principalement du bâtiment totalement enterré ou analysent la qualité de l'environnement intérieur, en se basant sur des mesures expérimentales sans étudier le flux d'air dans le modèle 3D. Porras-amores et al., 2019, ont étudié un modèle 2D de maison souterraine avec la porte d'entrée découverte, le tunnel d'accès et la cheminée du toit. Pour une température extérieure maximale, ils ont observé une stabilité thermique appréciable sans aucune consommation d'énergie. Le tunnel joue un rôle principal dans la ventilation naturelle du flux d'air qui s'échappe par la cheminée avec des vitesses plus faibles. Yu et al., 2020, ont effectué un examen complet des études de bâtiments souterrains concernant l'énergie, le confort thermique et la qualité de l'air. Ils ont découvert que la simulation numérique est largement utilisée pour analyser la performance énergétique, tandis que l'expérimentation est utilisée pour examiner la performance de la qualité de l'air intérieur. Les problèmes de transfert de chaleur doivent être améliorés pour refléter la précision des prévisions avec le coût du calcul et davantage de recherches sont nécessaires pour les performances de qualité de l'air. Shi et al., 2018, ont étudié les effets thermiques des enveloppes de bâtiments sur la consommation énergétique des locaux souterrains pour différentes zones climatiques de la Chine. Les résultats révèlent que, sur l'ensemble de l'année, les consommations d'énergie varient considérablement en fonction de la valeur du coefficient de transfert thermique global U des enveloppes du bâtiment. Yau et al.,

2018, ont mené une étude pour identifier les causes environnementales des problèmes de santé dans les bureaux. Le bureau est associé à un système de distribution d'air sous le plancher (UFAD) dans l'immeuble de bureaux. Les résultats indiquent que les diffuseurs parviennent moins efficacement à homogénéiser l'air dans l'espace de vie. L'humidité relative dépasse la limite de 70%. La concentration de CO₂ dépasse 1000 ppm et le formaldéhyde dépasse 0,1 ppm. Par conséquent, il y a une mauvaise conception et un mauvais entretien de la construction qui créent une dégradation de la qualité de l'environnement dans le bureau.

Zhu et al., 2020, ont évalué la performance thermique qualitatives et quantitatives d'une ancienne habitation troglodyte. La performance qualitative concerne l'orientation du bâtiment, la cour souterraine et l'enveloppe du bâtiment biomasse mais la performance quantitative concerne l'enregistrement des paramètres thermiques à l'intérieur du bâtiment sélectionné. Le logiciel Energyplus est utilisé pour la simulation numérique du modèle mathématique. Les résultats obtenus confirment que les stratégies adoptées dans la grotte souterraine sont très efficaces pour offrir un environnement confortable à l'intérieur des résidences rurales. Mukhtar et al., 2019, ont réalisé un article de synthèse intéressant, pour analyser l'histoire et les facteurs de conception des bâtiments souterrains, principalement le concept de système de ventilation, la qualité de l'environnement intérieur (IEQ), la conception passive et l'optimisation des bâtiments. Ils ont noté que l'utilisation, à la fois, de la conception passive et de l'approche d'optimisation dans la simulation est une technique intéressante pour améliorer le niveau IEQ.

En outre, la ventilation naturelle et les adoptions au sol peuvent réduire considérablement la consommation d'énergie du bâtiment. Hassan et El Kotory, 2019, ont discuté de l'urbanisation des bâtiments souterrains et de la possibilité de construire des projets de maisons dans les déserts d'Égypte. Ils ont utilisé une enquête, par questionnaire, pour évaluer l'étude et ont appliqué le test du Khi² pour analyser les résultats. Ils recommandent une éventuelle construction de nouveaux projets de logement dans les déserts occidentaux de l'Égypte, comme "Toshka", mais également dans les stations touristiques, en particulier, dans les projets de petite et moyenne taille.

Peu de travaux de modèle 3D, pour simuler le flux d'air à l'intérieur d'un locale souterrain, se trouvent dans la littérature. Posselt et al., 2015, ont réalisé un modèle de calcul dynamique des fluides qui estime le débit et la température d'air dans le bâtiment en temps réel. Ils sont parvenus à de réelles économies énergétique qui peuvent être réalisées sur la base de la surveillance 3D, en appliquant le contrôle du climat intérieur et la conception optimale du climatiseur. Ham et Golparvar-fard, 2013, ont proposé une méthode novatrice utilisant la vision

par ordinateur pour la modélisation énergétique 3D automatisée. Ce modèle utilise l'imagerie thermique et numérique avec une seule caméra thermique. Leurs résultats indiquent que l'application de cette méthode aux bâtiments existants est un outil très performant pour le diagnostic rapide des bâtiments.

Dans le présent travail, une nouvelle conception de bâtiment est étudiée. Elle consiste en une résidence traditionnelle à Metlili (Algérie). Généralement, dans cette région, chaque résidence contient une pièce semi-enterrée refroidie passivement par l'énergie géothermique. Le comportement thermique de la pièce est étudié numériquement par un modèle mathématique 3D, utilisant le code CFD Ansys, puis les résultats sont validés par les données de mesures expérimentales. Ce cas de base n'atteint pas un confort thermique acceptable. Par conséquent, quelques modifications simples sont introduites dans la conception de la pièce pour réduire la température intérieure. Plusieurs tests sont menés jusqu'à trouver la meilleure conception de pièce, assurant un niveau de refroidissement appréciable. Pour la température ambiante maximale de la journée la plus chaude (48°C), la prévision de température à l'intérieur de la nouvelle conception de locale montre que l'espace de vie offre une température intérieure confortable de 25°C . Ainsi, pour tous les jours de la période chaude, une bonne climatisation peut être assurée avec une consommation d'énergie négligeable.

4. Simulation du local semi-souterrain traditionnel

La simulation du local semi-souterrain traditionnel est utilisée pour la validation des résultats numériques en comparaison avec les mesures expérimentales.

4.1. Equations régissantes

Ce phénomène correspond à une convection naturelle provoquée par des transferts de chaleur à proximité des surfaces chauffées. En mécanique des fluides, en considérant le fluide comme un milieu continu, il est possible d'appliquer les lois classiques de conservation, à savoir (Traoré, 2018) :

- ✓ La loi de conservation de la masse, aussi appelée équation de continuité ;
- ✓ La deuxième loi de Newton (principe de conservation de la quantité de mouvement) ou équations de mouvement ;
- ✓ La loi de conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou équation d'énergie (Traoré, 2018).

En calculant les nombres Adimensionnelles Reynolds (Re) et Rayleigh (Ra), on trouve $Re < 2000$ et $Ra < 10^9$, donc le régime de l'écoulement est laminaire.

Dans le cas laminaire, l'écoulement est traité par la résolution de l'équation de continuité, l'équation d'énergie et l'équation de quantité de mouvement. De plus, l'écoulement est mené par une convection naturelle, donc, on introduit la relation de l'approximation de J. Boussinesq (Traoré, 2018).

4.1.1. Equation de continuité

Cette équation représente la loi de conservation de la masse appliquée à un volume de contrôle et s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad 3.1$$

Avec ;

ρ : la masse volumique

V : le vecteur de vitesse (Subramanian, 2020).

4.1.2. Equation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement, contenu dans le volume de contrôle, est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(V) \quad 3.2$$

Où

F : la force par unité de volume

μ : la viscosité dynamique (Olivier Bonnefoy, 2020).

4.1.3. Equation de conservation d'énergie

L'équation de conservation de l'énergie découle du premier principe de la thermodynamique, qui établit une relation entre les différentes formes d'énergie,

$$\text{Soit : } \frac{D}{Dt}(\rho C_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad 3.3$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T)$: La variation totale d'énergie.

$\Delta(\lambda T)$: La variation d'énergie par conduction.

q : La puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \Phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux

Les coefficients C_p , λ , et β correspondent respectivement à la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide (Clifford et Stephen, 2006).

4.2. Approximation de Boussinesq

Dans les configurations d'écoulement à l'intérieur d'une enceinte, les forces externes, principalement les forces gravitationnelles, jouent un rôle essentiel, particulièrement dans les cas de convection naturelle où la flottabilité intervient dans l'écoulement.

La conception des éléments physiques statiques n'est alors plus en phase avec le comportement de l'écoulement des fluides. L'effet de la convection naturelle est intégré dans l'équation de quantité de mouvement par la variation de la masse volumique. En prenant comme référence l'état thermodynamique (masse volumique ρ_0 et température T_0), on utilise le développement de Taylor pour exprimer l'équation d'état de la masse volumique ρ . (Bejan et Khairy, 1985).

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \frac{T-T_0}{T_0} + \dots \right] \quad 3.4$$

Développement de premier ordre :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad 3.5$$

Le terme β dans l'équation précédente représente le coefficient de dilatation isobare du fluide, c'est-à-dire :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P=cst} \quad 33.6$$

Le phénomène de convection naturelle est causé par la variation de la masse volumique du fluide, ce qui génère une force motrice volumique selon le principe d'Archimède, à laquelle s'oppose notamment une force de frottement visqueux. L'approximation de Boussinesq consiste à ignorer les variations de la masse volumique dans les équations de conservation, tout en les considérant comme force motrice dans le terme F de l'équation de conservation de la quantité de mouvement. (3.2) (Bejan et khairy, 1985).

4.3. Equations régissantes simplifiées

En choisissant un domaine de calcul tridimensionnel et un régime permanent, On peut formuler les différentes équations nécessaires à la résolution du problème étudié de la manière suivante :

4.3.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 3.7$$

u, v et w étant les composantes du champ de vitesse V (u, v, w), dans la direction x, y et z respectivement.

4.3.2. Equations de quantité de mouvement

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 3.8$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad 3.9$$

Suivant z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad 3.10$$

4.3.3. Equation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad 3.11$$

Les équations différentielles de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie constituent le modèle mathématique de l'écoulement laminaire en convection naturelle.

4.4. Les équations de transfert de la chaleur

4.4.1. La conduction

La conduction s'applique à un milieu immobile, dans la pratique, à des milieux solides. Mais, La conduction se produit également dans les fluides, mais nous nous concentrerons sur ce phénomène uniquement dans les cas où le mouvement du fluide est impossible, comme dans les couches limitées à proximité d'un corps solide ou dans les fluides confinés dans les pores d'un solide, par exemple. (Werner et al., 2010). Ce phénomène est régi par la loi de Fourier, tel qu'en considérant une plaque solide d'épaisseur dx d'aire A, (Figure 3-1). Une différence de température $dT = T(x + dx) - T(x)$ entre les deux faces de la plaque entraînera un courant de chaleur (ou puissance thermique, quantité de chaleur transportée par unité de temps dQ/dt exprime en (J/s = W) de la face la plus chaude vers la face plus froide. Cette puissance thermique est donnée par (Hassan et El Kotory, 2019) :

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \text{ ou } q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad 3.12$$

$\frac{dT}{dx}$: Le gradient de température au point x considéré.

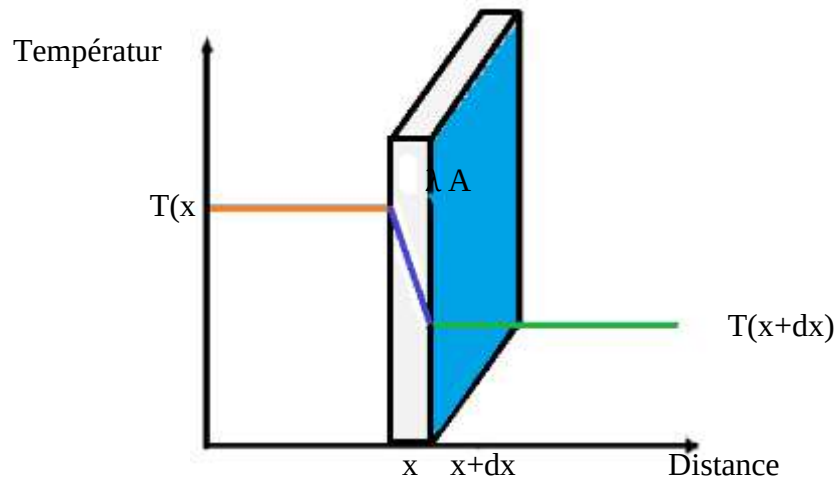


Figure 3-1 Répartition de la température dans une plaque.

4.4.2. La convection

La convection est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton (Hassan et El Kotory, 2019).

Il s'agit d'une relation dont la simplicité est trompeuse mais qui permet d'expliquer le phénomène global de la convection :

$$\varphi = h A (T_f - T_p) \quad 3.13$$

La convection naturelle se produit lorsque le mouvement du fluide est généré par les différences de densité entre les particules chaudes et froides dans un fluide, soumis à un champ de forces massiques. Lorsque le mouvement du fluide est accentué par un dispositif tel qu'un ventilateur, on parle de convection forcée. La convection est qualifiée de mixte lorsque les deux phénomènes, à savoir la convection naturelle et la convection forcée, se produisent simultanément (Bejan, 2013).

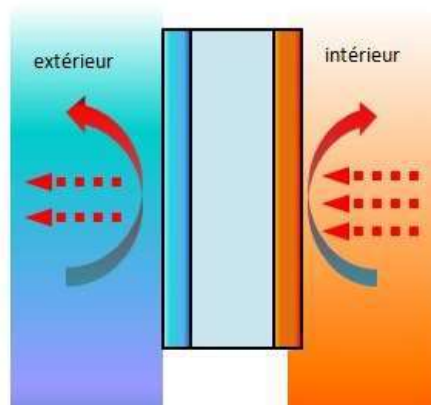


Figure 3-2 Schéma du transfert de chaleur par convection.

4.5. Calcul de la température équivalente

La température équivalente est celle qui tient compte de l'effet du rayonnement solaire sur la température ambiante. Elle s'exprime comme suit : (Meral Ozel, 2013) :

$$T_e = T_o + \frac{\alpha I_T}{h_o} - \quad 3.14$$

T_o : La température ambiante de milieu extérieur.

$\frac{\alpha}{h_o}$: Rapport de capacité d'absorption de la paroi extérieure $0.026 \leq \frac{\alpha}{h_o} \leq 0.052$ (Meral

Ozel, 2013).

Pour les murs de couleur claire $\frac{\alpha}{h_o} = \frac{0.45}{17} = 0.026 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{W}$

Pour les murs de couleur foncée $\frac{\alpha}{h_o} = \frac{0.9}{17} = 0.052 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{W}$

La résistance thermique d'échanges superficiels dans un mur verticale extérieur est $r_0 = 1/h_o = 0.06 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{W}$ (D.T.R C3.4. 1998).

$h_o = 17 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}^\circ$

Le facteur d'absorption α d'un mur extérieur est donné en fonction de la couleur de la face extérieure ($\alpha=0.45$ pour les couleurs clair et $\alpha=0.9$ pour les couleurs sombre), (D.T.R C3.4. 1998).

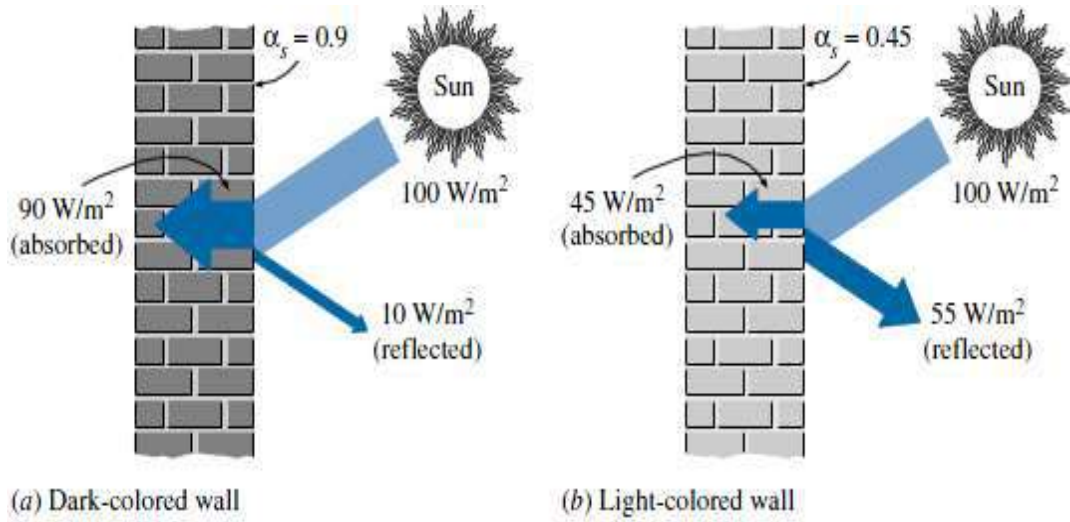


Figure 3-3 Différence d'absorption entre les murs de couleur foncée et claire.

$\frac{\varepsilon \Delta R}{h_o}$: Facteur de correction (on prend 4°C pour les surfaces horizontales, 0°C pour les surfaces verticales) (M Ozel et Ozel, 2012).

I_T : Le rayonnement solaire total

$$I_T = R_b I_b + I_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + I_{\rho_g} \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad 3.15$$

4.5.1. Rayonnement global

La somme du rayonnement direct et diffus.

$$I = I_d + I_b \quad 3.16$$

4.5.2. Rayonnement direct

C'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

$$I_d = B(\sinh)^{0.4} \quad 3.17$$

4.5.3. Rayonnement diffus

C'est la portion du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Ce rayonnement ne possède pas de direction privilégiée.

$$I_b = A(\sinh) \exp \frac{-1}{C \cdot \sin(h+2)} \quad 3.18$$

Où : A, B et C sont constants (A=1300, B=87, C=6)

4.5.4. Rayonnement direct sur une surface inclinée

La contribution du rayonnement direct sur une surface inclinée (sur de courtes périodes) peut être calculée en utilisant le facteur géométrique R_b (M Ozel et Ozel, 2012).

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\sin h} = \frac{\cos(\varphi-\beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\varphi-\beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\varphi \cdot \sin\delta} \quad 3.19$$

θ : L'angle d'incidence du rayonnement direct sur le concentrateur solaire.

θ_z : L'angle de zénith.

β : L'inclinaison de la surface définie comme l'angle entre la surface et l'horizontal.

4.6. Domaine du calcul et hypothèses

Pour l'exécution des calculs, on utilise les caractéristiques physiques de l'air, mentionnées dans le tableau 3-1 ci-dessous.

Tableau 3-1 Les expressions de paramètres physiques de l'air (Rasmussen, 1997) et (The Engineering ToolBox).

Désignation	Expression
Température moyenne entre Tmax et Tmin	$T_m = (T_{max} + T_{min})/2$
Masse volumique	$\rho = [1.1614 - 0.00353 (T_m - 300)]$
Viscosité dynamique	$\mu = [1.846 + 0.00472 (T_m - 300)] \times 10^{-5}$
Coefficient de dilatation thermique volumétrique de l'air	$\beta = 1/T_m$
Viscosité cinématique	$\nu = \mu/\rho$
Conductivité thermique de l'air	$\lambda = [0.0263 + 0.000074 (T_m - 300)]$
Chaleur spécifique du fluide	$C_p = [1.007 + 0.00004 (T_m - 300)] \times 10^3$

La Figure 3-4 montre le domaine de calcul du local. Du côté nord, il contient une cavité sous l'escalier. Près du mur et des ouvertures d'entrée et de sortie d'air, les mailles sont affinées. Les températures des surfaces des parois internes sont considérées comme des conditions aux limites mesurées par un ensemble de thermocouples. La surface verticale de l'extrémité de l'escalier est considérée comme une entrée d'air. Dans le cas de base, la situation critique de température ambiante maximale est le 5 juillet 2018 à 14 h, où la température ambiante atteint $T = 43^\circ\text{C}$. Puisque, dans le flux d'air, la variation de la pression est faible, la masse volumique qui varie en fonction du gradient de pression est négligeable. Ainsi, le flux d'air est considéré comme incompressible. Malgré l'hypothèse d'incompressibilité, en convection naturelle, l'approximation de Boussinesq est introduite car la masse volumique n'est pas complètement constante. Cela permet des changements de masse volumique négligeables, sauf, là où l'effet de gravité apparaît (composante z). Le flux d'air Q est supposé être dans un régime permanent, pris dans une durée limitée (environ 1h) de température ambiante maximale, qui présente la situation critique. Pour la convection forcée, à travers l'ouverture de la sortie d'air et de l'entrée d'air, la vitesse de l'air est très faible ($v < 0,07$ m/s), donc le nombre de Reynolds Re est petit ($Re < 2000$).

Par conséquent, le flux d'air est pris comme laminaire, puisqu'il y a la présence de la convection naturelle et la vérification du nombre de Rayleigh est nécessaire. Le calcul du nombre de Rayleigh (Ra) indique que $Ra = 5,57 \times 10^3$, ($Ra < 10^9$), donc, le régime de l'écoulement est laminaire.

4.6.1. Choix de maillage

Historiquement les maillages structurés sont les plus utilisés mais les maillages non structurés sont devenus beaucoup plus courants ces derniers temps. Cela est dû à leur génération de réseau plus rapide, à leur capacité à gérer des géométries complexes et au fait qu'aucune expérience significative, en matière de génération de réseau, n'est requise.

Dans cette étude nous choisirons le maillage non structuré car mes conceptions contiennent plusieurs angles et zones complexes, comme sous l'escalier.

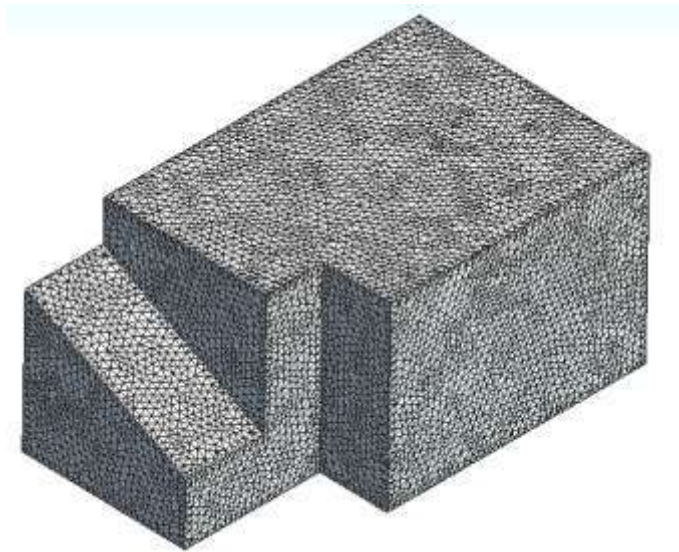


Figure 3-4 Domaine de calcul de local traditionnel.

4.7. Simulation numérique

Les équations aux dérivées partielles du modèle mathématique sont couplées, là où la résolution nécessite l'utilisation d'outils numériques, tels que le logiciel ANSYS-Fluent qui est couramment utilisé dans les problèmes CFD.

Pour traiter le couplage entre la pression et la vitesse, l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) établi par (Patankar et Spalding, 1972) est appliqué. Un schéma « upwind » de second ordre est adopté pour la discrétisation des équations gouvernantes (Sehli et al., 2012). Afin d'accélérer les itérations, les coefficients de

sous-relaxation sont laissés par défaut. Le niveau de température intérieure du flux d'air est examiné jusqu'à atteindre la convergence avec une erreur résiduelle de 10^{-6} pour diverses variables.

Pour l'indépendance des mailles, l'optimisation est effectuée pour minimiser le nombre de mailles, tout en gardant une précision acceptable des résultats. Une étude préliminaire est lancée, visant à déterminer le maillage le plus grand possible, tout en préservant la convergence

de la simulation. La détermination du meilleur maillage est basée sur la variation de la valeur de température en fonction du nombre de mailles. Le point choisi pour le test de température est à proximité de l'entrée d'air. Plusieurs tests sont effectués jusqu'à ce que la variation de la valeur de température soit très faible, là où le maillage atteint l'état optimisé.

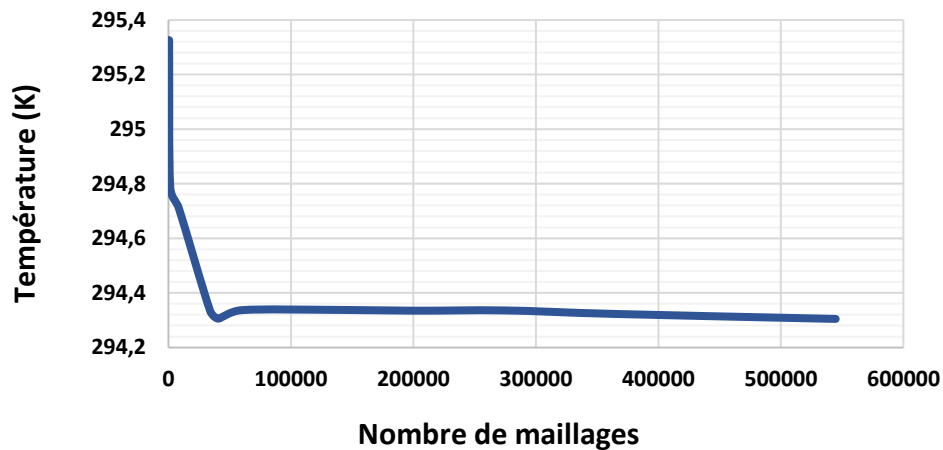


Figure 3-5 Tests d'indépendance du maillage.

Les résultats obtenus montrent que la variation de température est très faible et l'erreur relative absolue est inférieure à 10^{-3} au nombre de mailles atteint 137 316. La Figure 3-5 montre la courbe des différents tests d'indépendance des mailles. Dans le locale, les zones les plus fréquentées par les occupants se situent autour du milieu du locale ($z = 2,4$ m et $x = 1,7$ m). Pour cela, l'axe vertical est choisi comme référence représentative du confort thermique.

Tableau 3-2 Condition aux limites du local traditionnel.

Mur Hauteur(m)	Nord	Est	Ouest	Sud
0-1	297 K	297 K	297 K	297 K
1-1,6	300 K	300 K	300 K	300 K
1,6-2,2	302 K	302 K	302 K	302 K
2,2-2,7	308 K	308 K	311 K	312 K

Dans le tableau 3-2, on a les températures ou les conditions, aux limites du local traditionnel, mesurées par le thermomètre. Aussi, après mesure, la température du plancher est 295,8 K.

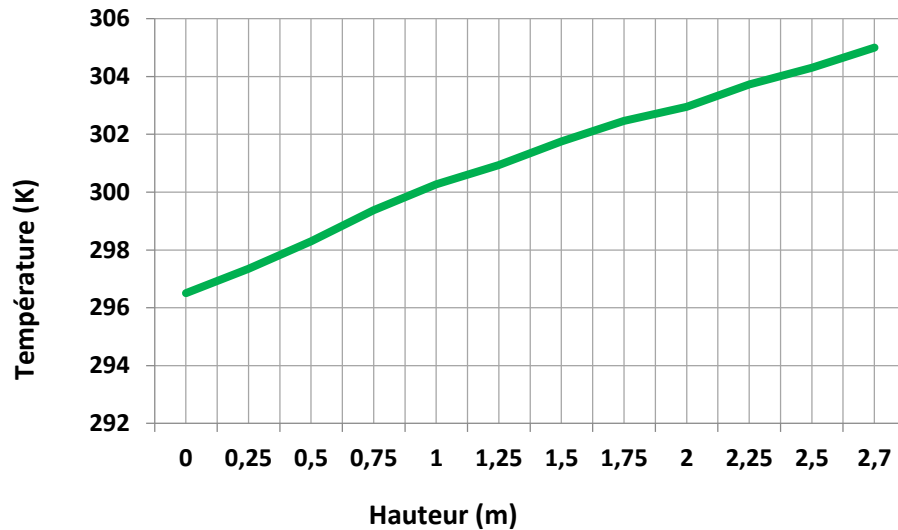


Figure 3-6 Température intérieure à $z = 2,4$ m et $x = 1,7$ m.

Sur cet axe vertical, la Figure 3-6 montre les données de simulation de la température. La température augmente progressivement du sol au toit. Au fond, la température est basse, en raison de l'effet direct du refroidissement géothermique mais en haut, la température est élevée, en raison de l'effet de l'entrée et de sortie de l'air ambiant à travers les petites fenêtres. Pour la validation du modèle, une campagne de collecte de température est réalisée à l'intérieur de la salle semi-souterraine à son axe vertical médian. Un ensemble de thermocouples, à affichage numérique, sont utilisés pour la mesure de température, ils sont de type K avec un intervalle de -1000 à 1250 ° et une précision de 0,5%.

Tableau 3-3 Résultats de la validation du modèle par rapport aux données expérimentales.

Hauteur(m)	0,00	0,25	0,5	0,75	1,00	1,25	1,5	1,75	2,00	2,25	2,5	2,7
T_{exp} (K)	296,5	298,00	299,10	300,20	301,77	301,80	302,56	303,08	303,67	304,21	304,57	305
T_{sim} (K)	296,5	297,35	298,17	299,37	300,27	300,93	301,75	302,46	302,95	303,73	304,11	305
Erreur relative (%)	0,00	0,22	0,31	0,28	0,50	0,29	0,27	0,20	0,24	0,16	0,15	0,00

Le tableau 3-3 montre la bonne concordance entre la simulation et les données expérimentales, où l'erreur relative absolue ne dépasse pas 0,50%.

4.8. Contours de la température

Dans tous les Contours 3D, nous divisons le local en quatre (4) parties pour une vue de trois (3) plans parallèles, La Figure 3-7 montre les Contours de température. Ils indiquent que le niveau de température confortable se situe uniquement au fond de la pièce. Dans la partie sup de la chambre, la température est élevée en raison de l'influence de l'air ambiant. Le coin

supérieur ouest est plus chauffé que celui de l'est, en raison des rayons solaires incidents dans l'après-midi. Dans la partie avant gauche, l'augmentation de température est prolongée jusqu'au sol de la pièce, elle est due à l'entrée de la pièce assurant l'entrée d'air (air relativement chaud).

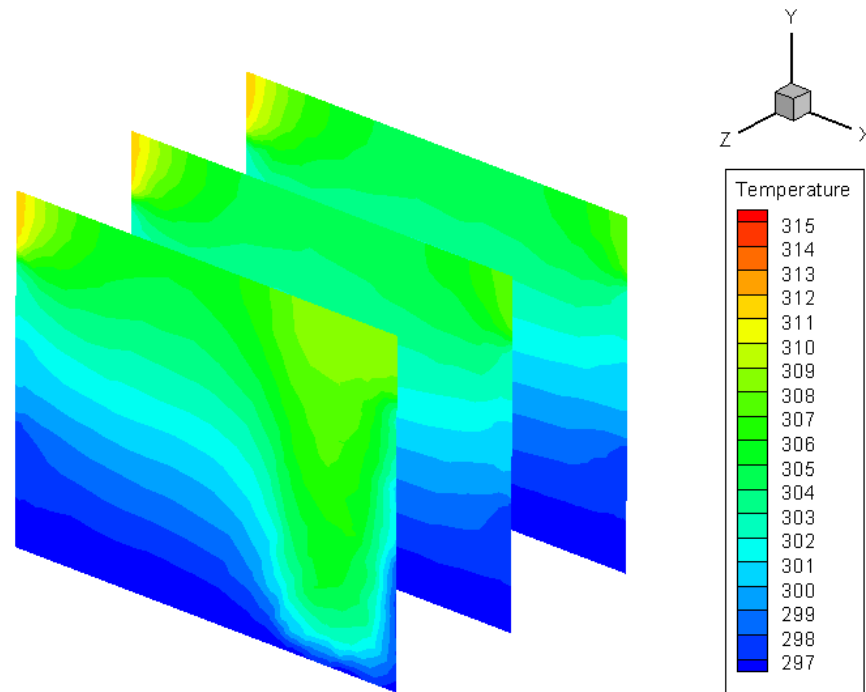


Figure 3-7 Contours de température dans la conception 3D du local traditionnel.

La Figure 3-8 montre les Contours de température sur le plan médian vertical à $x = 1,7$ m, le niveau de température n'est confortable que dans un niveau limité de la surface habitable du local.

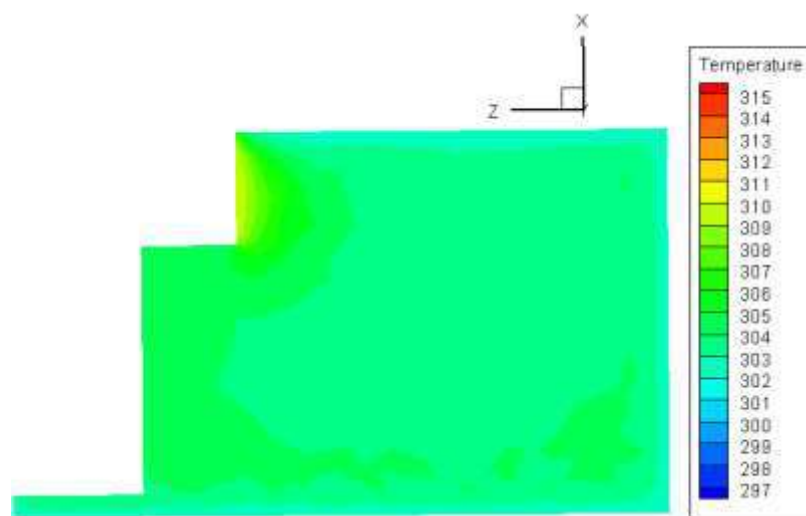


Figure 3-8 Contours de température sur le plan horizontal à $y = 2$ m de haut du local traditionnel.

La Figure 3-8 montre la température sur le plan horizontal à la hauteur de la pièce de 2 m, qui est d'environ 31°C. Ce niveau de température est nettement inférieur à la température ambiante extérieure (43 °C) mais il n'atteint pas un bon confort thermique. La principale cause de cette insuffisance est la large ouverture d'entrée qui n'a pas de séparation entre l'entrée de la chambre et le bout de l'escalier. Ainsi, la pièce nécessite une nouvelle conception qui devrait contenir une porte de séparation pour réduire l'effet de l'air chaud d'entrée.

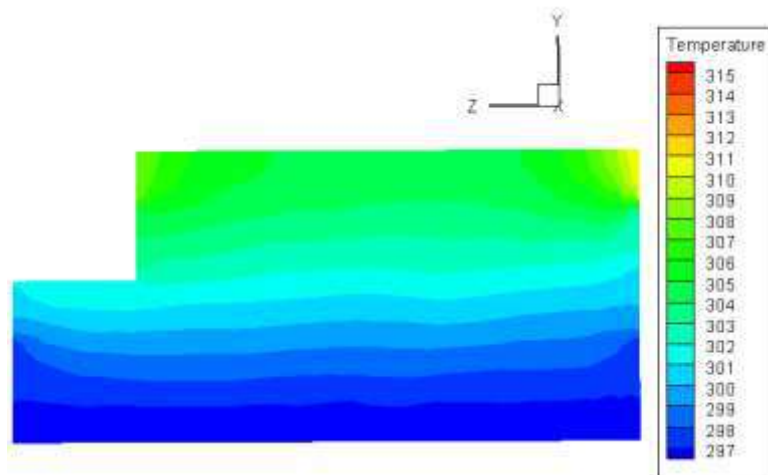


Figure 3-9 Contours de température sur le plan médian vertical à $x = 1,7$ m du local traditionnel.

4.9. Contours de vitesse

Le champ dynamique peut être présenté par les Contours des vitesses qui sont illustrés par les Figures 3.10, 11 et 12. On constate la présence de deux cyclons à l'intérieur de la zone, l'intensité de vitesses est presque symétrique par rapport à l'axe de milieu du local. Mais, un excès de l'intensité apparaît près de la sortie, à cause de l'air extérieur.

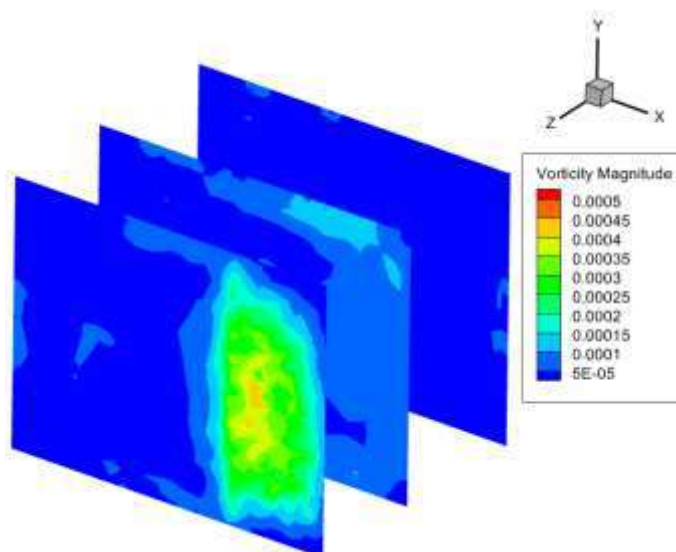


Figure 3-10 Contours de vitesse dans la conception 3D du local traditionnel.

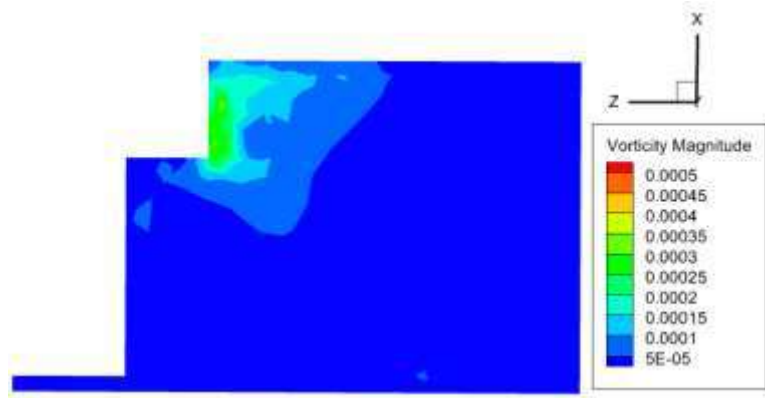


Figure 3-11 Contours de vitesse sur le plan horizontal à $y = 2$ m de haut du local traditionnel.

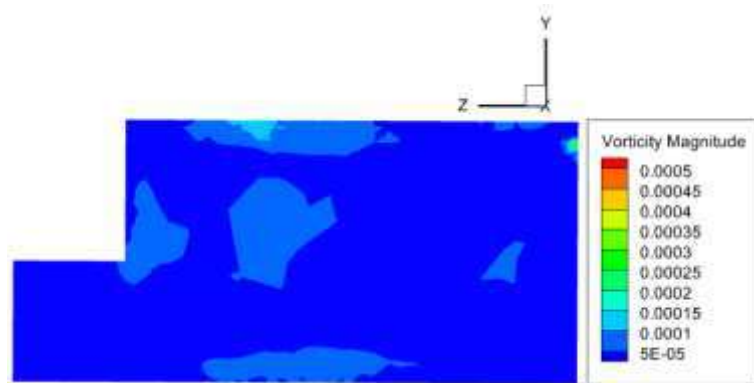


Figure 3-12 Contours de vitesse sur le plan médian vertical à $x = 1,7$ m du local traditionnel.

5. Simulation du local semi-souterrain proposé

Pour améliorer les performances de refroidissement, notre choix a été d'apporter quelques modifications simples à la conception traditionnelle de la chambre sans affecter la structure générale de la maison.

5.1. Forme de conception

La largeur d'origine du local (3,4 m) est prolongée de 170 cm. Cette distance est creusée sous le couloir qui constitue la deuxième entrée de la maison via le garage. Cette extension permet la construction de nouveaux escaliers souterrains avec une plus grande profondeur de la chambre. Le niveau du sol du couloir sera augmenté de 0,5 m afin d'obtenir le même niveau de toit de salle. La profondeur d'origine de la chambre (2,2 m) sera prolongée dans le sol de 0,8 m. En outre, le local proposé est conçu avec une cavité séparée contenant les escaliers, où une porte en bois est ajoutée pour l'entrée de la chambre. L'endroit le plus approprié pour l'ouverture de l'entrée d'air est choisi au bas de la porte (Figure 2-6 dans le chapitre précédent).

L'évacuation de l'air chaud est faite par une ouverture de sortie, située sur le toit de local du coin ouest-sud. Cette sortie d'air est ouverte sur le premier étage de la maison, où la

température est relativement inférieure à la température ambiante. Comme pour le local traditionnel, la partie haute de la chambre (0,5 m) est au-dessus du niveau du sol, ce qui permet à la fenêtre côté ouest de contribuer à l'éclairage du local. Ces fenêtres seront renforcées par des plaques extérieures en double vitrage pour réduire les infiltrations de chaleur. Les fenêtres peuvent être ouvertes la nuit pour permettre une aération libre.

5.2. Conditions aux limites

Puisque le toit est couvert par le premier étage et a une bonne isolation, il est considéré comme une limite adiabatique. La température de l'ouverture de sortie du toit, mesurée à l'intérieur du premier étage, atteint 307 K. Les parties au-dessus du sol des côtés du local sont exposées à l'environnement ambiant. Les fenêtres sont placées du côté ouest et contribuent uniquement à l'éclairage du local. La température équivalente de la surface extérieure du mur ouest prend en compte l'effet du rayonnement solaire sur la température ambiante et s'exprime comme suit : (Meral Ozel, 2013).

$$T_e = T_o + \frac{\alpha I_T}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad 3.20$$

T_o : Température ambiante.

$\frac{\alpha}{h_o}$: Taux de capacité d'absorption de la surface extérieure $0.026 \leq \frac{\alpha}{h_o} \leq 0.052$ (M Ozel et Ozel, 2012).

$\frac{\varepsilon \Delta R}{h_o}$: Un facteur de correction (4 °C pour les surfaces horizontale et 0 °C pour les verticales), IT : rayonnement solaire total.

Les températures internes de la vitre et des parois situées au-dessus du sol (partie non enterrée) sont calculées en tenant compte de la conduction thermique, à travers leurs épaisseurs. La résistance thermique du mur est déterminée par l'épaisseur de la paroi, composée d'une couche de plâtre externe (2 cm), d'une brique (20 cm) et d'une couche de plâtre interne (2 cm).

À une hauteur inférieure à 3 m, la température du sol et des parois de la partie enterrée de la pièce sont prises avec les mêmes valeurs de température du sol pour les conditions aux limites. Pour le mois de juillet, les températures du sol de différentes profondeurs (z) sont obtenues à l'aide du modèle mathématique donné par (Ben Jmaa derbal et Kanoun, 2010).

Le modèle est exprimé par l'équation suivante :

$$T(z, t) = T_{mean} + A \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{d} \right] \exp\left(-\frac{z}{d}\right) \quad 3.21$$

T_{mean} : température annuelle moyenne du sol, (est prise 23,8°C)

A : amplitude de la température de surface du sol, (est prise 14°C)

t : coordonnée temporelle ($t = 0$ à partir du 1^{er} janvier à 0 s).

t_0 : constante de phase (temps de température maximale de la surface du sol).

$\omega = 2\pi/P$ où P est la période de la sinusoïde.

$$d = (2\alpha/\omega)^{0.5}$$

où α est la diffusivité thermique du sol: $\alpha = \lambda_{\text{soil}} / (C_{\text{psoil}} * \rho_{\text{soil}})$.

λ_{soil} , ρ_{soil} et C_{psoil} sont respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique du sol.

5.3. Détermination des conditions aux limites

En utilisant les relations des conditions aux limites mentionnées dans les équations précédentes, on calcule la température interne des parois de la partie supérieure qui est au-dessus du sol et au sous-sol (1 mètre), qui sont influencées par le rayonnement solaire et la température ambiante. Dans la partie inférieure, où la profondeur dépasse 1 mètre, la même température de la terre est considérée. Les résultats du modèle sont validés par rapport aux données expérimentales mesurées en mai 2013, par (Saifi et al., 2015) (Figure 3-13).

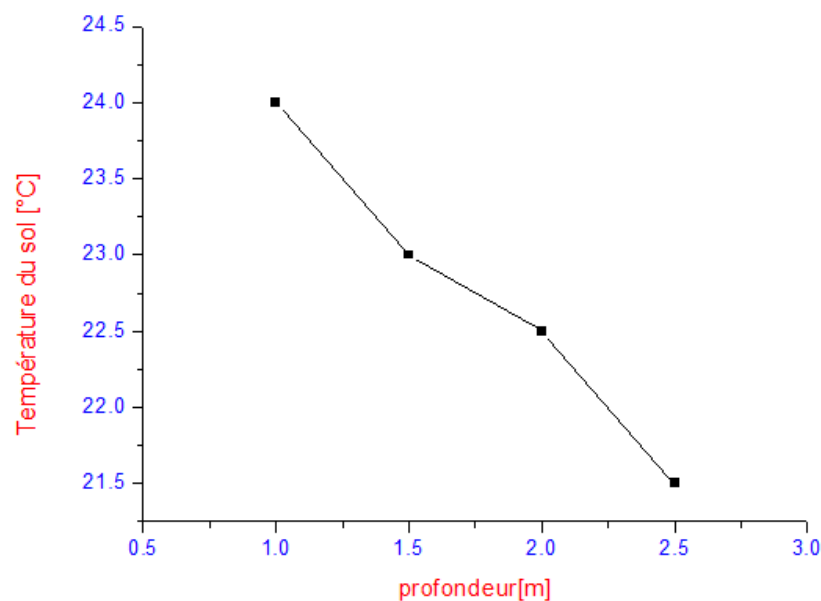


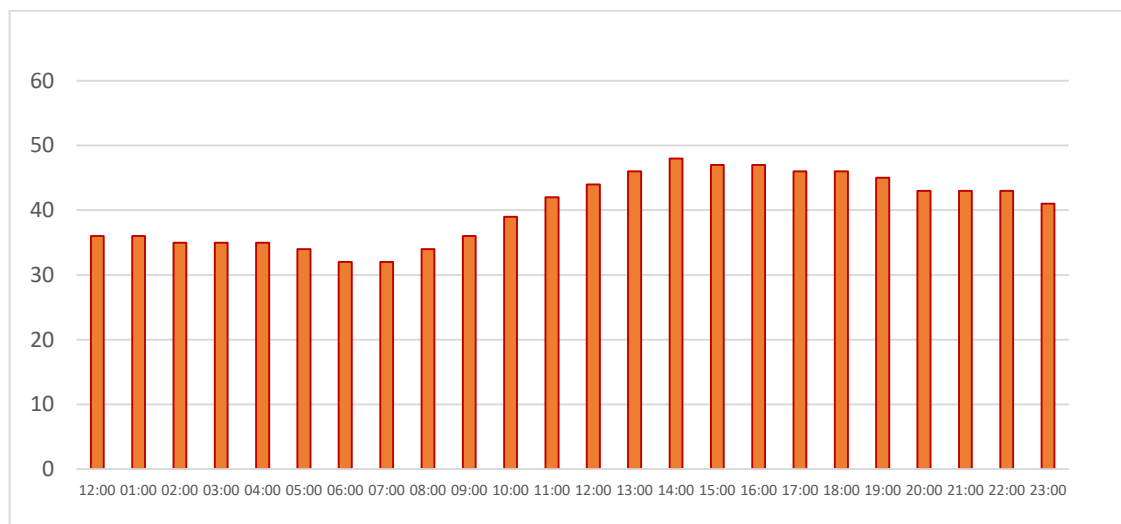
Figure 3-13 Température souterraine en fonction de la profondeur (Saifi et al., 2015).

D'après les modelés de l'équation 3.21 et les résultats du modèle de Figure 3-13, les conditions aux limites du locale sont illustrées dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 Condition aux limites du local semi-souterrain.

Mur Hauteur(m)	Nord	Est	Ouest	Sud
0-1	295.8 K	295.8 K	295.8 K	295.8 K
1-2	298 K	298 K	298.5 K	298.5 K
2-3	299.4 K	300 K	301 K	302 K
3-3,8	302 K	303 K	304 K	305 K

Grâce aux deux ouvertures (à la porte et au toit), le flux d'air se déplace par effet de convection naturelle dans la pièce semi-enterrée. Pour le régime permanent, la situation critique est prise à la température ambiante la plus élevée. Le jour le plus chaud de l'été 2018, dans la ville de Metlili, est le 15 juillet et le moment le plus chaud est à 14 h 00, lorsque la température ambiante atteinte 48 °C. La Figure 3-14 indique la variation de température ambiante dans le jour le plus chaud à Metlili.

**Figure 3-14** Températures dans la journée (15/07/2018) dans la ville de Metlili

(Bureau national de météorologie – Algeria, 2017).

5.4. Premier cas : Ventilation naturelle

5.4.1. Contours de température

La Figure 3-15 illustre les Contours de température sur des plans parallèles de conception 3D. Ils présentent une distribution variée dans le côté sup de la chambre. Il est à noter que la température, dans l'espace de vie de la pièce, est améliorée par rapport à la pièce traditionnelle. La température ne dépasse pas 29°C, sauf dans des zones très isolées dans les coins du toit.

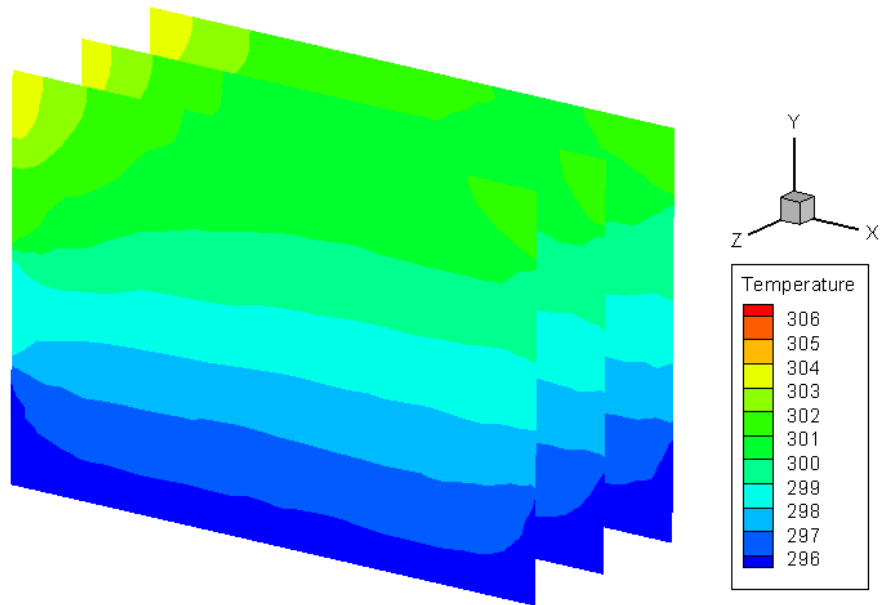


Figure 3-15 Contours de température du local proposé avec convection naturelle.

La Figure 3-16 montre les Contours de température en plan horizontal ($y = 2 \text{ m}$), près de l'entrée, la température est relativement élevée mais elle diminue progressivement jusqu'au milieu du local, où elle se stabilise à 25°C , principalement dans la moitié supérieure du local.



Figure 3-16 Contours de température dans le plan horizontal du local proposé.

Cette insuffisance de ventilation naturelle est soulignée par les Contours de température illustrés par la Figure 3-17 du plan médian à $x = 2,55 \text{ m}$. Ces Contours montrent que la température de confort (25°C) est limitée uniquement au premier quart de la pièce à partir du sol.

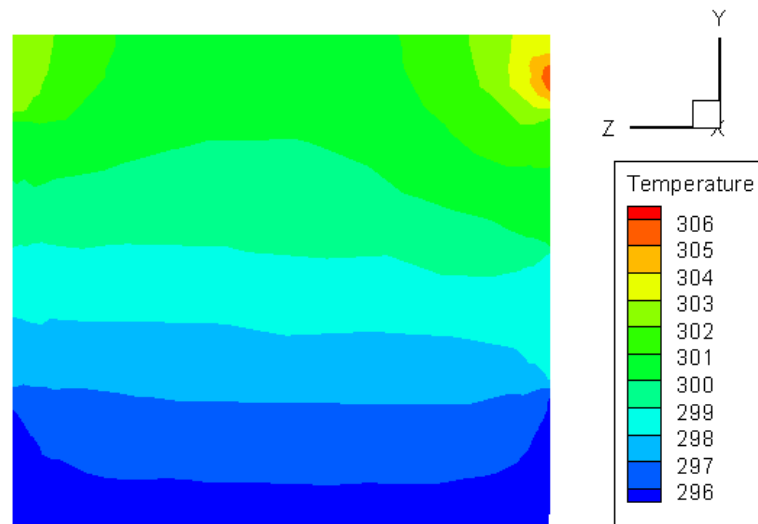


Figure 3-17 Contours de température dans le plan médian du local proposée.

La Figure 3-18 montre la température sur l'axe vertical médian de la chambre ($x = 2,55$ m et $z = 2,4$ m). Pour une hauteur inférieure à 2 m, la température ne dépasse pas 27°C , elle est meilleure que pour les résultats du local traditionnel mais elle a encore besoin d'améliorations supplémentaires pour atteindre une température confortable.

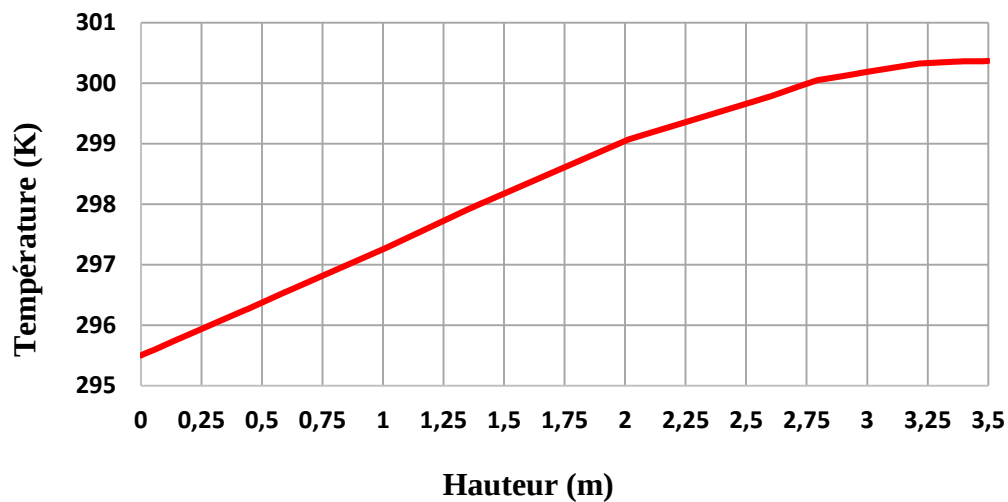


Figure 3-18 Température sur l'axe médian du local ($x = 2,55$ m, $z = 2,4$ m).

5.4.2. Contours de vitesse

Les Contours de vitesse du local proposé, qui sont indiqués dans les Figures 3.19, 20 et 21, montrent une légère augmentation de la distance séparant le plancher du local et la zone de plus forte vitesse dans le cyclone. Par exemple ($V_{\max} = 4,00 \times 10^{-5}$ m/s), qui est une vitesse acceptable pour un être humain. Généralement la vitesse varie entre 2 et $4,00 \times 10^{-5}$ m/s dans les zones occupées par la population.

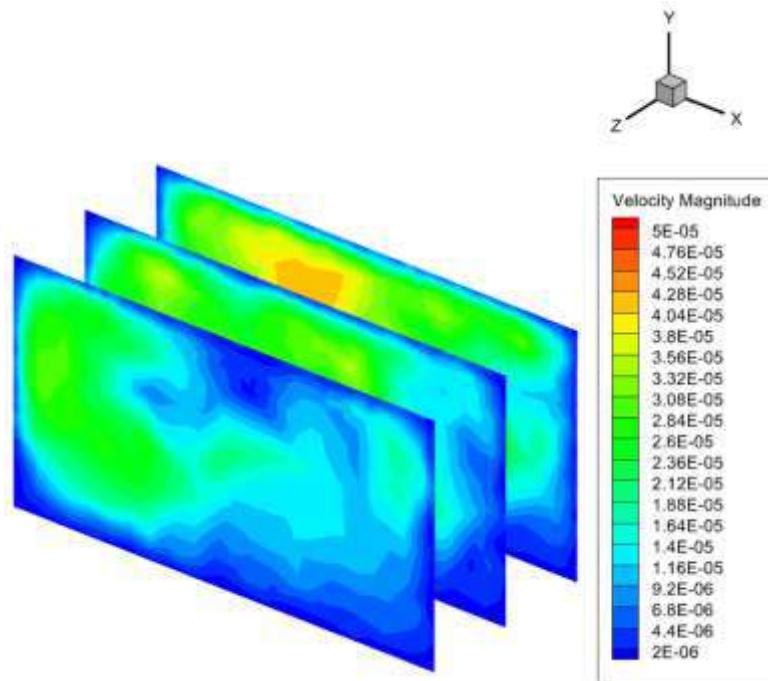


Figure 3-19 Contours de vitesse du local proposé avec convection naturelle.

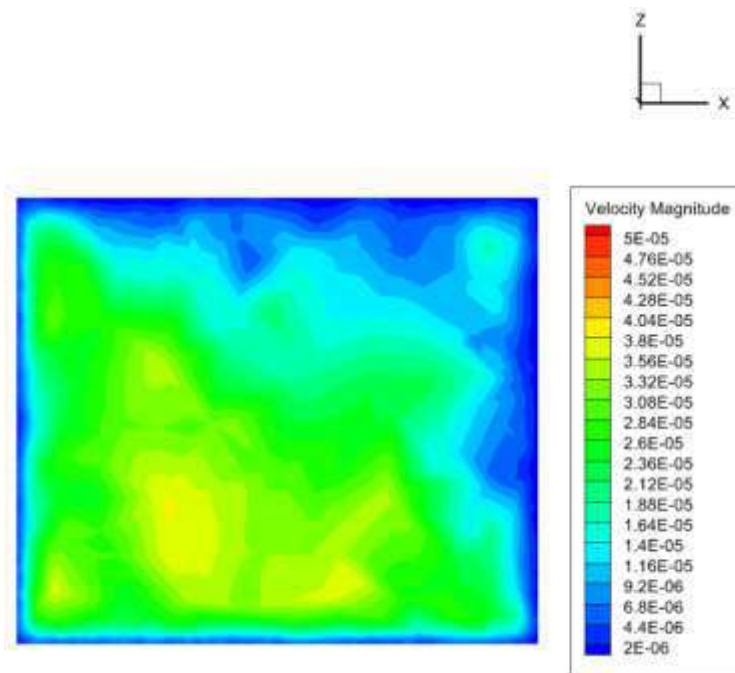


Figure 3-20 Contours de vitesse dans le plan horizontal du local proposé

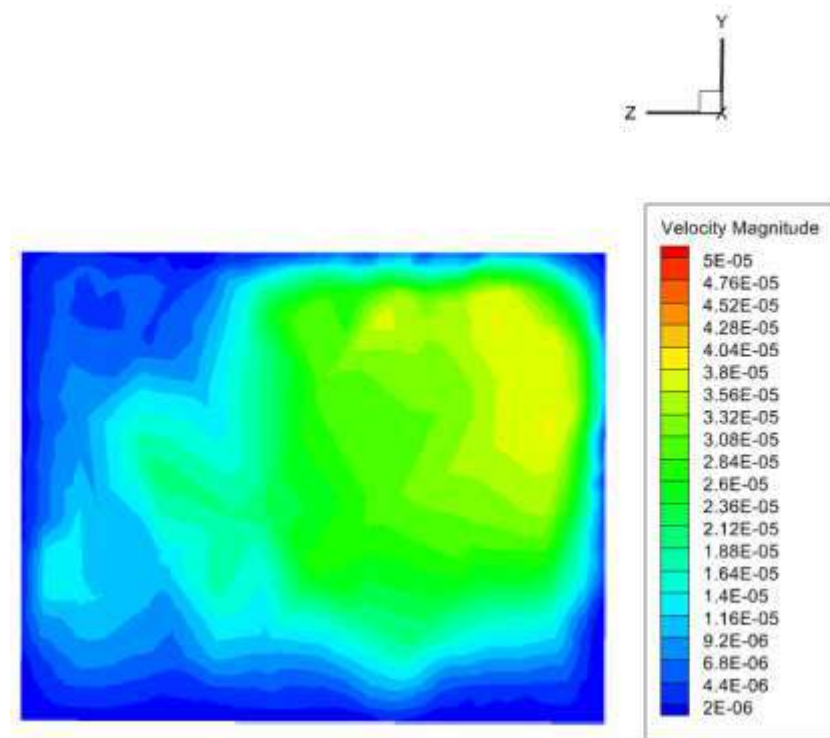


Figure 3-21 Contours de vitesse dans le plan médian du local proposé.

5.5. Deuxième cas : Convection avec ventilateur

5.5.1. Contours de température

Pour obtenir plus d'amélioration du premier cas (avec convection naturelle), un petit ventilateur est ajouté à l'entrée d'air. Pour cette ventilation à air forcé, un ventilateur approprié est choisi dans le catalogue du fabricant (SIKU-Silenta manufacturer). La puissance nominale du ventilateur choisi est de 24 W, avec un débit d'air de 292 m³/h, une vitesse de 1.4 m/s et une faible consommation d'énergie, considérée comme une charge électrique négligeable.

L'endroit le plus approprié, pour installer le ventilateur, se trouve dans l'ouverture d'entrée d'air au bas de la porte (Figure 3-22). La cavité sous les escaliers est réaménagée comme une grande armoire fermée pour éviter la stagnation du flux sous les escaliers.

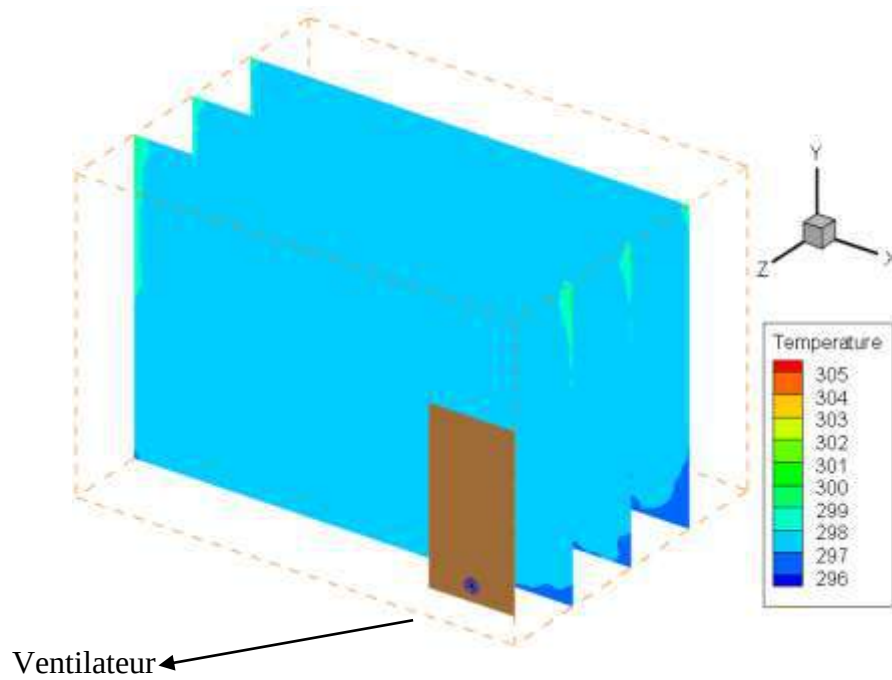


Figure 3-22 Contours de température du local proposé, avec ventilateur.

Dans ce cas, le ventilateur renforce le mouvement du flux d'air pour balayer facilement l'intérieur de la chambre.

Les courbes de température montrent une distribution uniforme dans presque toutes les parties de la chambre (local semi-souterrain) (Figure 3-22). Dans ce local, presque tout l'espace de vie pour l'activité quotidienne est à un niveau de température de 25°C.

La Figure 3-23 montre les Contours de température en plan horizontal ($y=2\text{m}$), la température diminue progressivement jusqu'au milieu de la chambre où elle se stabilise à 25°C.



Figure 3-23 Contours de température dans le plan horizontal du local proposé, avec ventilateur.

Cette insuffisance de ventilation naturelle est soulignée par les Contours de température illustrés par la Figure 3-24 du plan médian à $x=2,55\text{m}$. Ces Contours montrent que la

température de confort (25°C) n'est limitée que dans le premier quart de la chambre à partir du sol. De plus, cette Figure montre la température sur le plan vertical médian de la pièce ($x=2,55\text{m}$). Pour différentes distances de la chambre, entre l'entrée et l'arrière, la température ne dépasse pas 25°C .

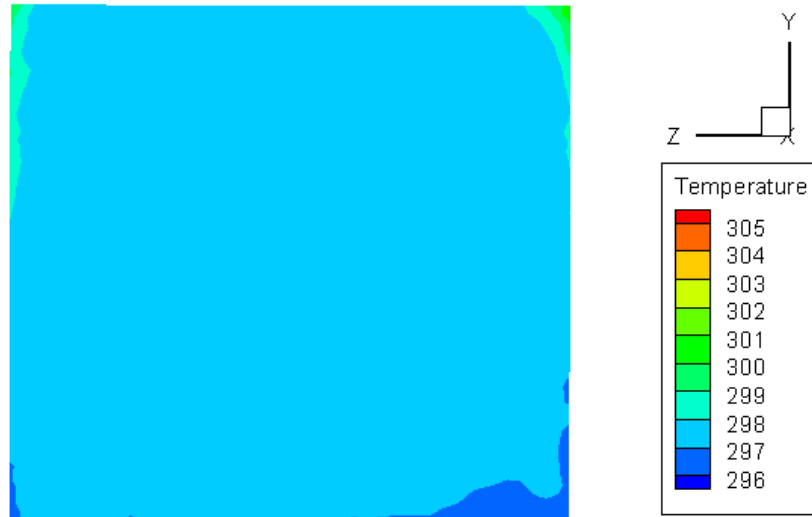


Figure 3-24 Contours de température dans le plan médian du local proposé, avec ventilateur.

La même remarque est notée pour la Figure 3-25, où la température dans l'axe vertical médian du local proposé ($x=2,5\text{ m}$ et $z=2,4\text{ m}$) reste inférieure à 25°C . Ces résultats présentent une amélioration supplémentaire et la chambre semi-souterraine atteint une température confortable.

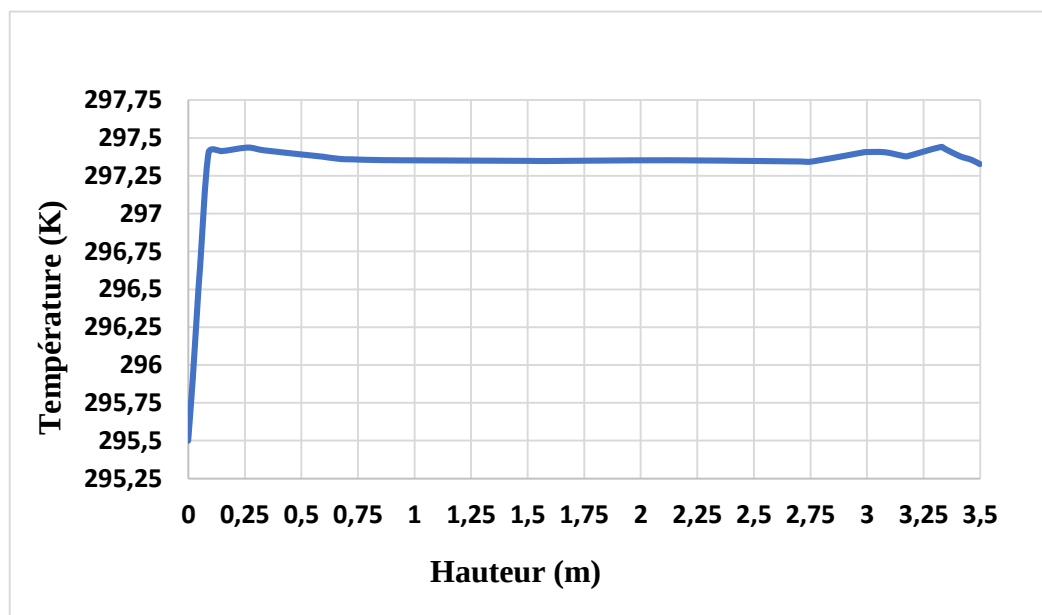


Figure 3-25 Température à l'axe médian de local ($x=2,55$ et $z=2,4\text{ m}$) du local, avec ventilateur.

5.5.2. Contours de vitesse

Les Contours des vitesses, dans cette modification, qui sont indiqués dans les Figures 3-26, 27 et 28 montrent une augmentation considérable de la vitesse, en comparaison avec les précédentes, et varie entre 0,08 et 0,5 m/s. Mais l'espace occupé est presque symétrique à la vitesse 0,09 m/s. ceci est acceptable selon les normes internationales.

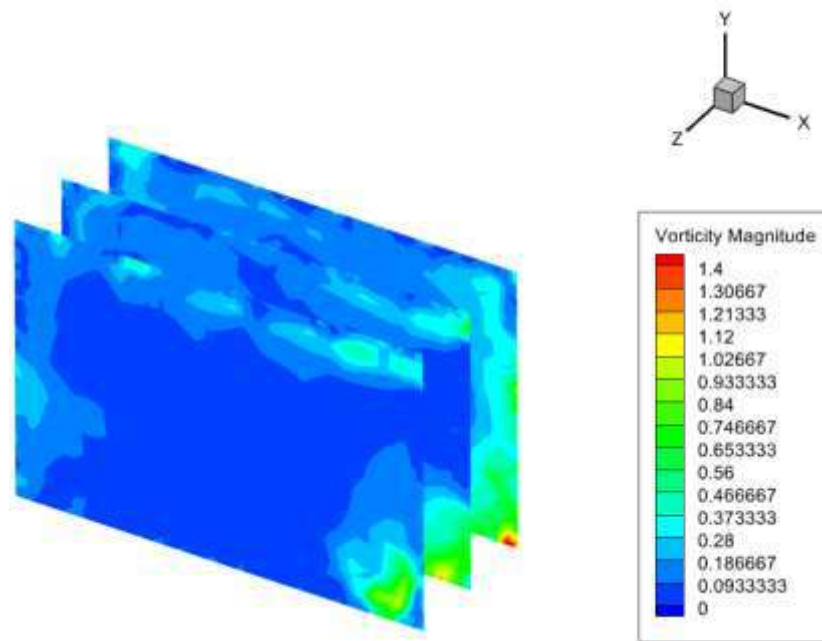


Figure 3-26 Contours de vitesse du local proposé, avec ventilateur.

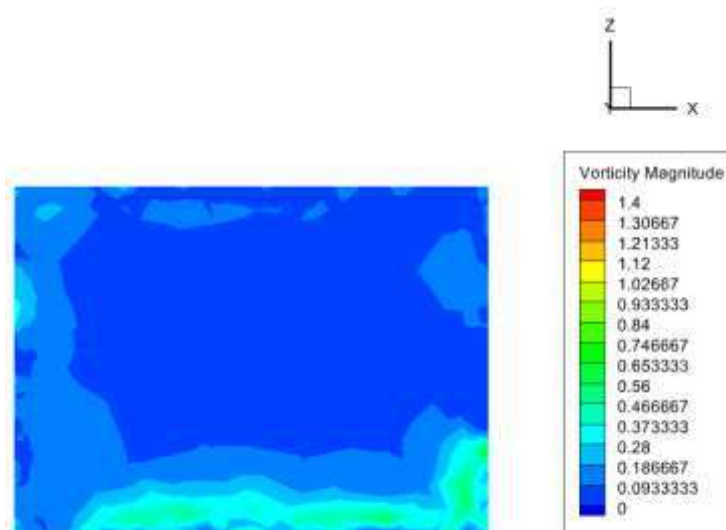


Figure 3-27 Contours de vitesse dans le plan horizontal du local proposé, avec ventilateur.

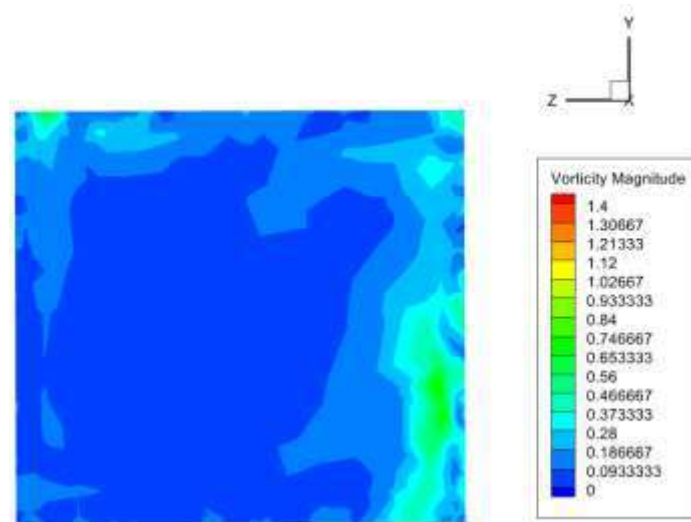


Figure 3-28 Contours de vitesse dans le plan médian du local proposé, avec ventilateur.

Généralement, la hauteur maximale d'un occupant ne dépasse pas 1,9 m. Par conséquent, la ligne médiane horizontale située à une hauteur de 1,9 m est choisie comme référence de test pour la vitesse de l'air. Sur cette ligne médiane, la Figure 3-29 montre l'amplitude de la vitesse qui est étendue entre 0,02 et 0,07 m/s. Ce niveau de ventilation d'air reste non gênant et assure une bonne aération pour les occupants de la chambre. Ce dernier cas montre une bonne amélioration de la ventilation de l'air et de la baisse de température à l'intérieur de la chambre.

En effet, le local atteint un confort appréciable pour les occupants en été.

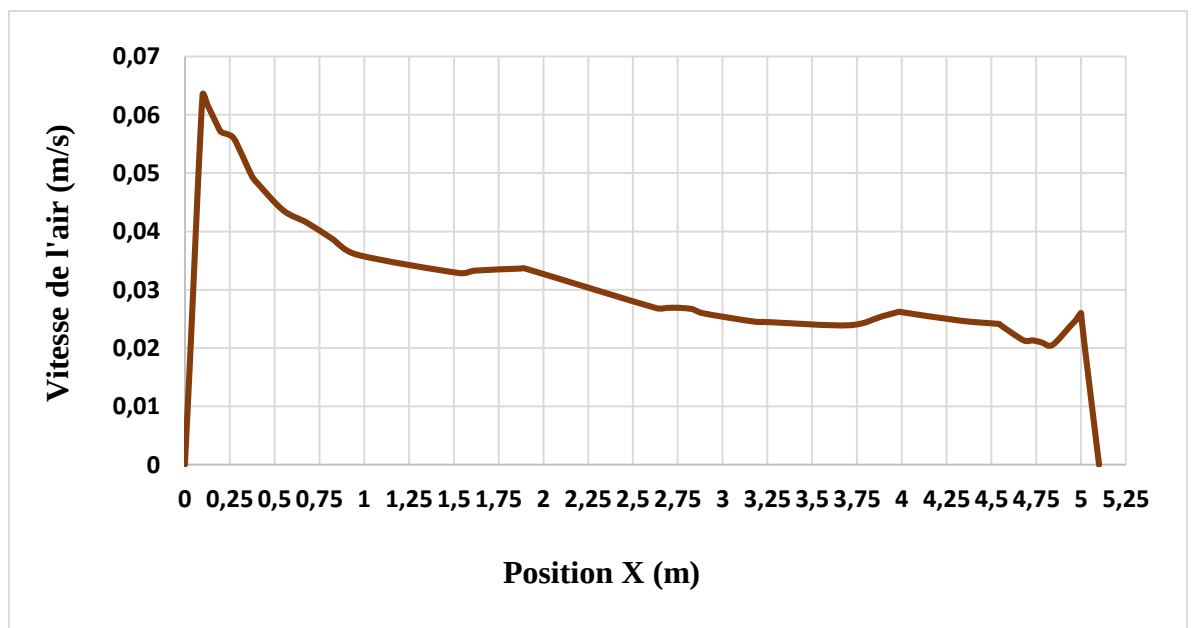


Figure 3-29 Amplitude de vitesse sur l'axe $y = 1,9$ m, $z = 2,4$ m. (avec ventilateur).

5.6. Comparaison entre la chambre traditionnelle et les solutions proposées

Certaines modifications simples sont introduites dans la construction de la maison traditionnelle sans nuire à la structure générale du bâtiment. Ces modifications conduisent à une conception de construction intéressante qui permet un bon refroidissement passif dans le climat désertique. L'effet de la nouvelle conception est clarifié par la comparaison de la température intérieure à l'axe médian de la chambre entre la résidence traditionnelle et les deux solutions proposées (Figure 3-30).

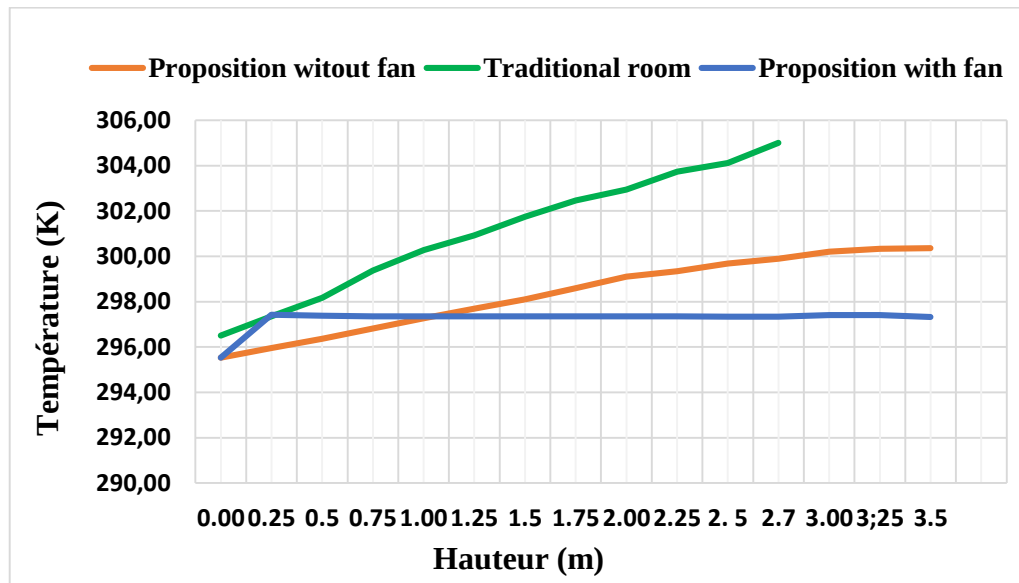


Figure 3-30 Comparaison entre le local traditionnel et les designs proposés.

Il est à noter que les niveaux de température des deux solutions proposées sont nettement inférieurs à ceux de la chambre existante. Pour la chambre traditionnelle, la chute de température à 2 m de hauteur de la chambre, sur l'axe vertical médian du local est de 3°C, par rapport au premier cas mais elle atteint 5°C, pour le second cas, pour atteindre 25°C. De plus, pour le cas de ventilation forcée, la température intérieure est stabilisée à environ 25°C, à partir de 0,25 m de hauteur de chambre mais pour les deux autres cas, la température augmente continuellement. En plus d'améliorer l'aspect thermique, le ventilateur apporte une nette amélioration de l'aération de la chambre, donnant plus de confort aux occupants.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, le comportement thermique d'un local semi-souterrain, dans le climat chaud, est examiné par simulation de flux d'air en trois dimensions et par les mesures expérimentales de la température intérieure. Les résultats de la simulation, du flux d'air dans le cas de base du local semi-souterrain, sont validés par les données expérimentales. Les résultats du local, du cas de base, montrent une performance insuffisante du refroidissement passif dans une période chaude de l'été. Deux conceptions proposées sont examinées dans la situation critique de la température ambiante.

La première conception examinée sous ventilation naturelle montre une amélioration sensible du confort thermique. Mais, la deuxième conception, renforcée par un petit ventilateur, montre un meilleur refroidissement passif, où la température est très acceptable dans tout l'espace de vie du local. Pendant la période très chaude (48 °C), les deux configurations montrent que la conception des locaux semi-souterrains présente une solution très intéressante pour la conception du bâtiment. La température au milieu du local ne dépasse pas 25°C à une hauteur de 2 m, tandis que la température pour une hauteur comprise entre 2 m et 3 m, la température oscille entre 25°C et 27,5°C. En cas de ventilation forcée, le niveau de ventilation reste non gênant et assure une bonne aération de la chambre. Le local atteint un refroidissement très appréciable et est considéré comme un confort thermique acceptable, avec de petites dépenses de consommation d'énergie.

Chapitre 4 Intégration des systèmes énergétiques

1. Introduction

Pour l'exploitation des systèmes énergétiques dans le chauffage, aux niveaux des résidences, on distingue quatre techniques principales :

L'énergie géothermique, par le biais de l'échangeur air/sol qui est déjà expliqué dans le chapitre 2.

Les systèmes photovoltaïques, pour l'alimentation électrique qui feront l'objet d'analyse au prochain chapitre.

Le chauffage solaire, utilisé pour le conditionnement d'air pendant le jour et le chauffage d'eau, en exploitant l'air chaude circulant au-dessous des panneaux solaires (Khenfer et al., 2020) et qui peut être associé au système PV de ce chapitre.

Pour étudier le confort thermique et les échanges entre les différentes zones à l'intérieur du premier étage, on utilise le logiciel TRNSYS (TRN BUILD) pour simuler et trouver les besoins énergétiques optimales ou la consommation annuelle de notre bâtiment. Une modélisation effectuée avec TRNSYS permet de déterminer les températures de surface et les flux thermiques (Hamdani, 2016).

2. Le chauffage solaire

Le chauffage solaire permet de chauffer de l'eau et d'assurer le chauffage de la maison. C'est un chauffage économique, écologique et gratuit, qui peut comporter le stockage dans des réservoirs spéciaux.

Dans ce système, le fluide transfère généralement sa chaleur soit directement, soit en traversant la dalle, qui transmet ensuite la chaleur au sein de l'air ambiant de la maison. Ainsi, la dalle agit comme un intermédiaire entre le fluide et l'air (Figure 4-1). L'utilisation de réservoirs de stockage de fluide chaud peut chauffer la dalle de la maison pendant la nuit. Selon le fluide caloporteur, il en existe deux types: à eau et à air.

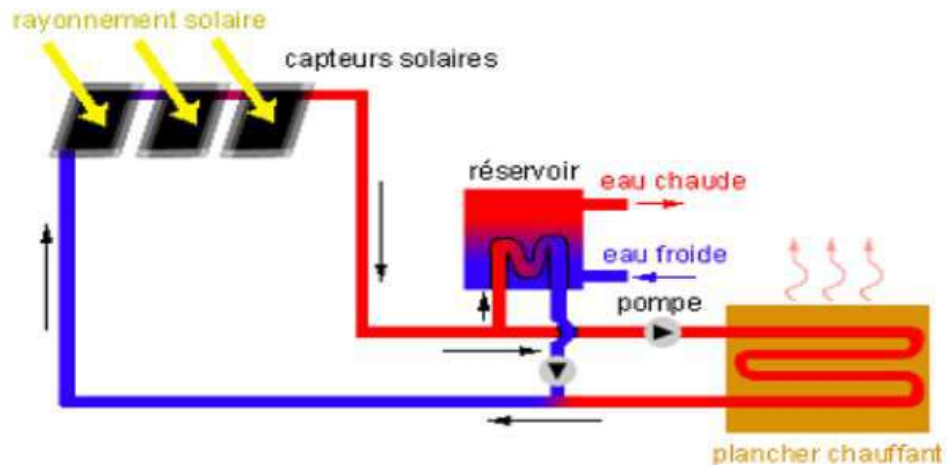


Figure 4-1 Installation destinée au chauffage des maisons.

2.1. Chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire est un dispositif conçu pour convertir l'énergie solaire en chaleur et la transmettre à l'eau par des processus de transfert thermique. L'eau chaude est stockée dans un réservoir isolé, pour une utilisation pendant les périodes d'absence de soleil. Le système comprend en général un ou plusieurs capteurs solaires, un réservoir de stockage et un circuit de fluide thermique, lequel transfère la chaleur captée par les capteurs solaires au réservoir de stockage. Le type qui est, largement, utilisé dans le monde est le chauffe-eau solaire individuel à thermosiphon indirect (Sellami et al., 2016).

Environ 317 litres d'eau peuvent être chauffés à 42°C par un PTC (collecteur à auge parabolique), sachant que la consommation moyenne quotidienne d'eau chaude dans une maison à Ouargla est de 250 litres à 42°C. (Benmenine et Ghodbane, 2020). L'application du chauffage d'eau par l'énergie solaire en Algérie répondrait aux besoins de la population en eau chaude, en particulier dans les hauts plateaux et les régions Saharienne, qui ont un ensoleillement quotidien très considérable et qui représentent 80% de la superficie totale du pays. (Sellami et al., 2016). L'installation du chauffe-eau solaire dans les régions algériennes comme Djelfa, Tamanrasset et Alger est prometteuse, en raison de son potentiel solaire élevé. En effet, le système fonctionne toute l'année. Ceci est très important car cela permet de réduire la période de rentabilisation de ce type d'investissement (Bahria et al., 2016).

2.2. Types d'installations de chauffage solaire

Il existe trois paramètres principaux dominant le type d'installation : type de chauffe-eau, la capacité du réservoir (ballon) et la surface des panneaux solaires (LePanneauSolaire), répartis en deux grandes familles de chauffe-eau solaire (Brahimi, 2018).

2.2.1. Chauffe-eau solaire à circulation naturelle

Au cours des vingt (20) dernières années, des installations thermosiphon (SWH) ont été installées par des établissements publics pour la fourniture d'eau chaude sanitaire du secteur résidentiel (Pahlavana et al., 2019).

Le Thermosiphon (circulation naturelle) veut dire que la circulation de la chaleur passe par des capteurs au réservoir naturellement sans énergie extérieure (Yettou et al., 2008). Il en existe deux types dans cette famille :

a- Chauffe-eau solaire à thermosiphon sans échangeur

Dans le collecteur, l'eau chaude est envoyée vers le ballon de stockage et remplacée par de l'eau froide, qui chauffe à son tour. La circulation de l'eau doit être continue pendant la journée, bien que le processus soit relativement lent. L'eau chaude s'accumule dans la partie supérieure du réservoir, car elle est plus légère que l'eau froide (Bouhired, 2010).

b- Chauffe-eau solaire à circulation naturelle avec échangeur

Les systèmes de chauffage-eau solaire utilisent des échangeurs de chaleur pour transférer l'énergie solaire absorbée dans les capteurs vers le liquide où l'air est utilisé pour chauffer l'eau. Les systèmes de chauffage solaire emploient souvent le cuivre, en raison de sa conductivité thermique élevée et de sa forte résistance à la corrosion (ENERGYGOV, 2020).

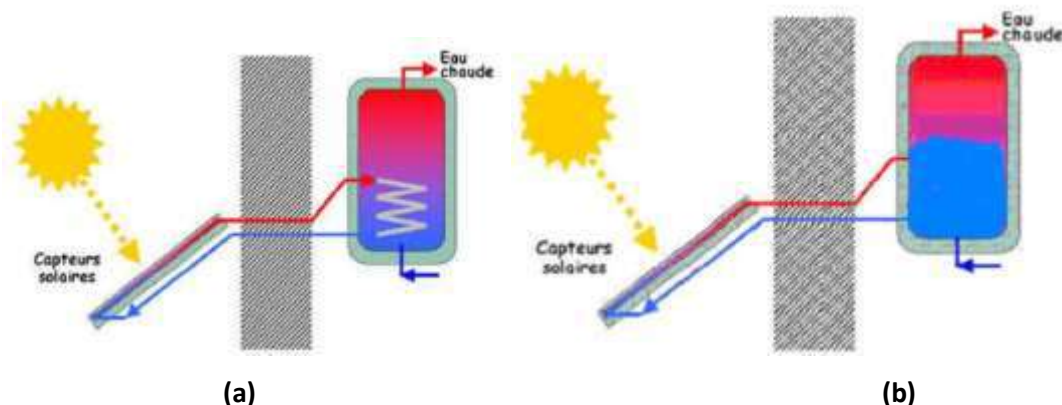


Figure 4-2 Chauffe-eau solaire en thermosiphon, (a) avec échangeur, (b) sans échangeur.

2.2.2. Chauffe-eau solaire à circulation forcée

Dans le système à circulation forcée, le principe est le même que celui de la circulation naturelle mais en circulation forcée, une pompe électrique est utilisée pour un débit massique

constant. L'eau chauffée dans le collecteur monte et s'écoule vers la partie supérieure du réservoir de stockage, tandis que l'eau froide du réservoir est acheminée vers le collecteur grâce à une pompe électrique (Yettou et al., 2008), (Jadhao et al., 2017) et (Brahimi, 2018).

Nous en avons également deux types dans cette famille :

a- Chauffe-eau solaire à circulation avec échangeur à l'intérieur du réservoir de stockage

Dans ce type l'eau est stockée dans le réservoir de stockage, le fluide caloporteur circule dans le circuit principal (collecteur, échangeur- collecteur), En absorbant l'énergie thermique à l'intérieur du capteur, celle-ci est ensuite transférée au maximum vers l'eau du réservoir à travers l'échangeur (Li et al., 2014).

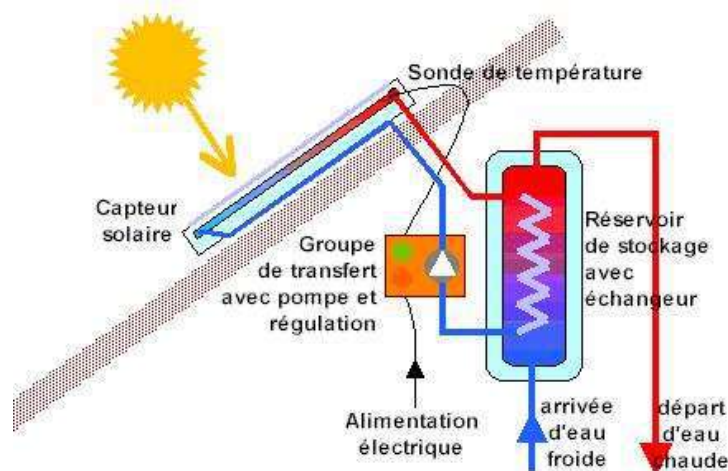


Figure 4-3 Chauffe-eau solaire, avec échangeur à l'Intérieure de réservoir.

b- Chauffe-eau solaire à circulation avec échangeur à l'extérieur de réservoir de stockage

Le fluide se réchauffe dans les capteurs solaires, puis transfère cette chaleur à l'eau froide en circulant. L'eau stockée pour le chauffage solaire est ainsi réchauffée dans l'échangeur, mais elle se refroidit progressivement au fur et à mesure de son utilisation. L'eau froide entre au réservoir par le bas, l'eau chaude en sort par le haut (Tecsol, 2002).

2.3. Collecteurs photovoltaïque-thermique

Le collecteur solaire hybride photovoltaïque-thermique (PV/T) ou capteur solaire mixte permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir de fluides comme l'air et l'eau. L'énergie solaire est ainsi exploitée sous ses deux formes principales : thermique et électrique. Les cellules photovoltaïques servent à transformer l'énergie solaire en électricité. L'écoulement d'un fluide caloporteur permet de récupérer la chaleur dégagée du système. Cela permet non seulement de refroidir les cellules photovoltaïques, mais aussi de valoriser la

chaleur générée, ce qui augmente le rendement électrique en refroidissant les panneaux et améliore l'efficacité globale du système grâce à la récupération de la chaleur. (Khenfer, 2021).

2.3.1. Différents types de collecteurs solaires PV/T

Ces collecteurs solaires thermiques-photovoltaïques sont destinés à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique et électrique.

Il y a plusieurs types de collecteurs solaires :

- PV/T à air : Production d'électricité et utilisation de l'air préchauffé généré dans l'espace sous les panneaux photovoltaïques.
- PV/T à eau en fonction juxtaposées : Production de l'énergie électrique et l'eau chaude sanitaire.
- PV/T bi fluide (air et eau) : Production simultanée de l'énergie électrique et thermique (eau chaude sanitaire, air préchauffé).

2.3.2. Collecteur PV/T à air

L'Aéro-voltaïque c'est le mix des PV, qui produisent de l'énergie électrique et récupèrent la chaleur dégagée en utilisant de l'air. L'air circule et se réchauffe en contact avec les absorbeurs ou dans une zone à effet de serre. Une fois chauffé, cet air est ventilé et dirigé vers les espaces à chauffer (Figure 4-4) (Khenfer et al., 2020).

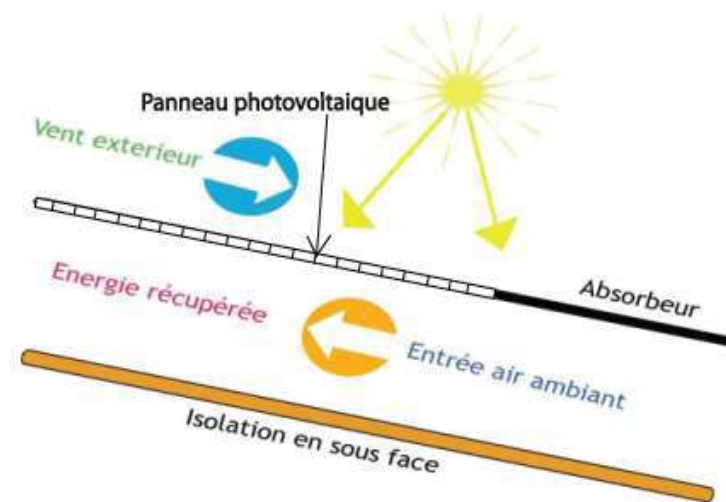


Figure 4-4 Collecteur PV/T à air.

2.3.3. Collecteur PV/T à eau

Ses capteurs solaires produisent de l'électricité et de l'eau chaude. Cette dernière rejoint ensuite le ballon de stockage, elle peut être utilisée seulement comme eau chaude sanitaire. Dans un système solaire combiné, le réservoir de stockage peut être connecté à deux circuits d'eau chaude : l'un destiné à l'eau chaude sanitaire et l'autre pour le chauffage, qui alimente soit des radiateurs à eau, soit un plancher chauffant (Figure 4-5) (Boumaaraf et al., 2019).

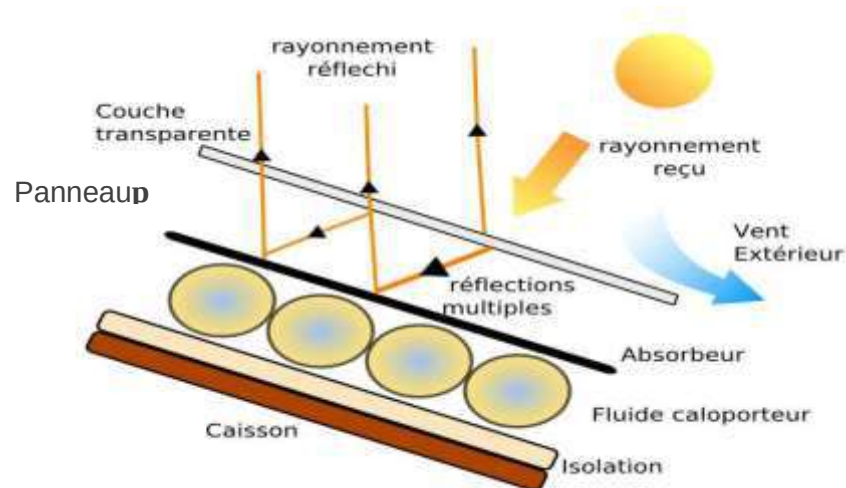


Figure 4-5 Collecteur PV/T à eau.

2.3.4. Collecteur PV/T bi fluide air-eau

Ces collecteurs sont constitués des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques qui utilisent deux fluides permettant de produire l'air et l'eau chauffés par le collecteur et en plus production d'électricité (Othman et al., 2016).

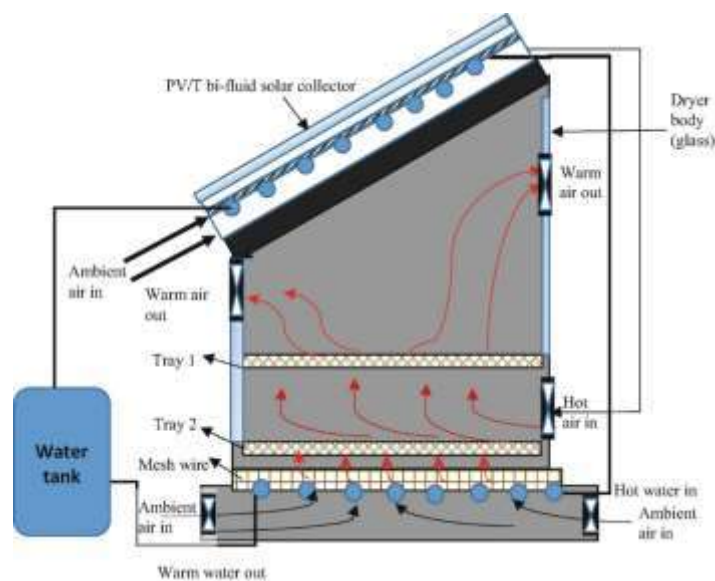


Figure 4-6 Collecteur PV/T bi fluide air-eau.

3. Outil de simulation

Le logiciel TRNSYS est un logiciel d'étude des phénomènes physiques. Il évalue les exigences énergétiques d'un bâtiment ou d'une résidence d'une manière plus précise. Ce logiciel est utile, le plus largement reconnu, a été développé depuis 1975 par un consortium de laboratoires de recherche et d'universités (Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin-Madison, le CSTB, la société Transolar) (Arantes, 2014).

Dans ce travail, nous utiliserons différents logiciels pour traiter les données climatiques et modélisée les besoins énergétiques annuels du bâtiment :

Le logiciel METEONORM est utilisé comme source de fichiers météo.

Le logiciel TRNSYS c'est un logiciel de simulation des phénomènes thermique des systèmes énergétiques, comme le réseau de production ou de la consommation énergétique des bâtiments.

3.1. METEONORM

Le logiciel METEONORM constitue une base de données météorologique offrant des données climatologiques pour les applications en génie solaire à l'échelle mondiale. Il génère des années types de manière stochastique, à partir de moyennes mensuelles interpolées sur le long terme. Ces résultats reflètent une année moyenne de la période climatologique choisie, en fonction des paramètres définis par l'utilisateur. Les résultats ne correspondent pas à une année historique réelle, mais à une année hypothétique qui représente statistiquement une année type pour l'emplacement sélectionné. Ce logiciel présente les caractéristiques suivantes :

- Un logiciel dédié aux calculs climatologiques.
- Une source de données pour les programmes de simulation dans les applications passives, actives et photovoltaïques de l'énergie solaire, avec des interfaces de données complètes.
- Un outil de normalisation permettant aux développeurs et aux utilisateurs de logiciels de conception technique d'accéder à une base de données météorologique complète et cohérente.
- Une référence en météorologie pour la recherche environnementale, l'agriculture, la foresterie, ainsi que pour toute personne intéressée par la météorologie et l'énergie solaire ;
- Il est également une source de données pour les séries chronologiques en cours de données météorologiques, basées sur des données satellitaires et de ses analyses. (Meteonorm, 2020).



Figure 4-7 Interface graphique METEONORM.

3.2. TRNSYS Studio

C'est l'interface entre la conception du bâtiment à modéliser et TRNSYS pour lancer la simulation du projet (Trnsys16, 2016).

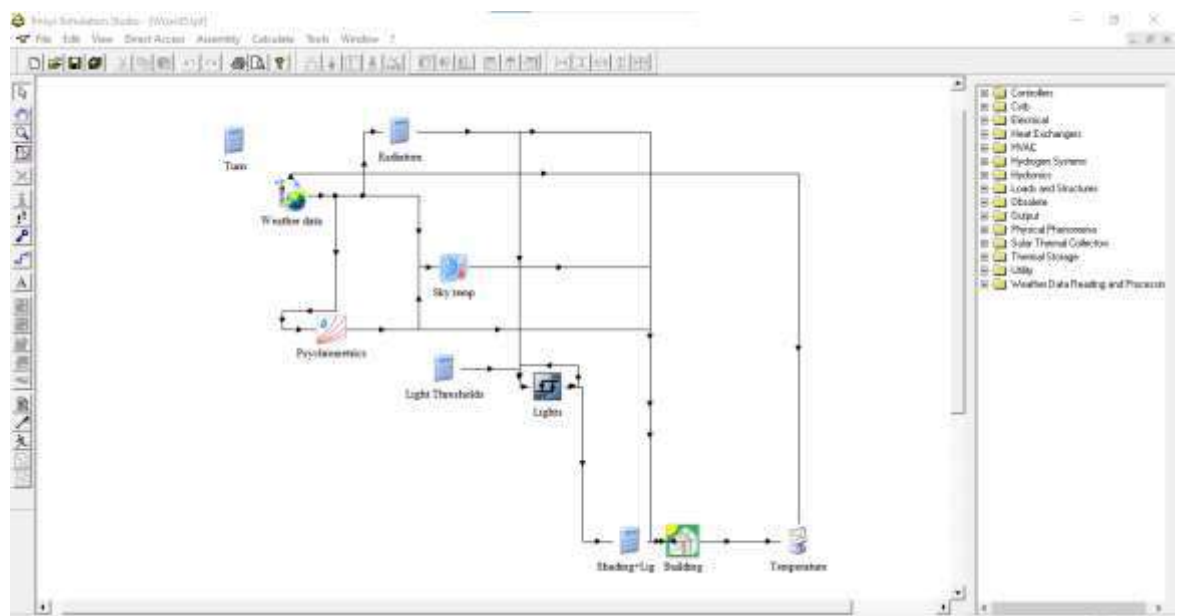


Figure 4-8 L'interface TRNSYS studio de Projet de validation.

3.3. TRN-Build

Il s'agit le programme de traitement des données, qui permet de commander tous les paramètres thermique et physique du bâtiment. Le bâtiment est représenté par un ou plusieurs zones, chaque zone représente une chambre ou un local (Trnsys16, 2016). Le projet étudié est

une maison d'une surface de 132 m². Pour définir les zones, il faut définir les parois (compositions, orientations, ventilation, chauffage, climatisation, confort et humidité. Les gains, les infiltrations...). Le logiciel propose les paramètres thermiques (conductivités, capacités thermiques et masse volumique) du matériau.

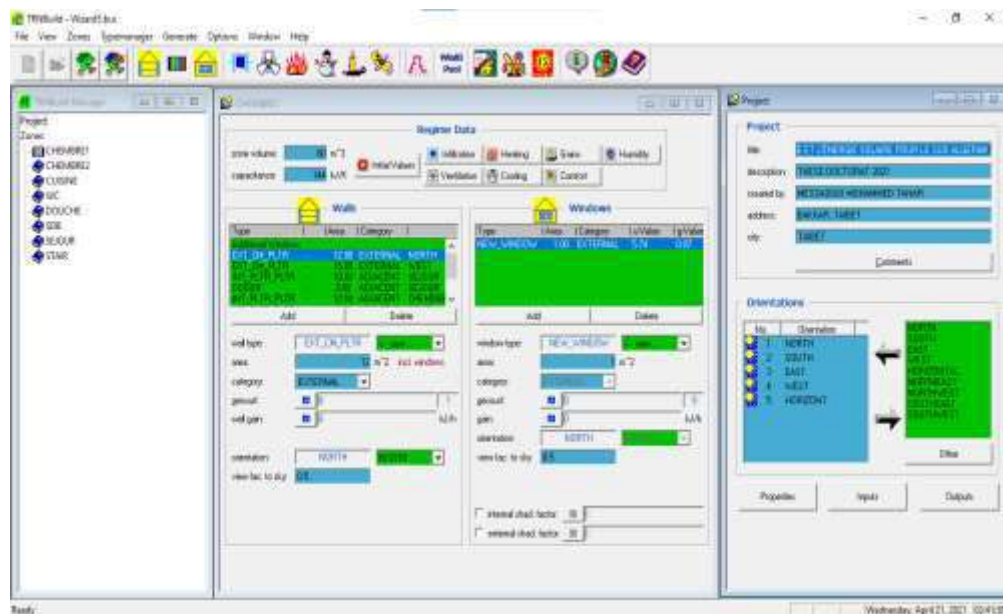


Figure 4-9 L'interface TRNBuild de projet de validation.

4. Paramètre du bâtiment

Le climat de la région orientale du nord du Sahara algérien (les Oasis) est semblable (Ouargla, Ghardaïa et El-Oued). À titre d'exemple, dans notre étude à Metlili, avec une coordonnée géographique (32,16° N, 3,38° E). La surface du premier étage de la résidence est de 132 m² (Figure 2-8).

4.1. Dimensions des zones

Les murs extérieurs sont doublés, en mur en brique creuse d'une épaisseur de 10 cm et lame d'air de 4 cm entre les deux, L'extérieur est revêtu d'un mortier de ciment, tandis que l'intérieur est terminé en plâtre. Les murs de séparation, ainsi que les murs intérieurs, sont construits en briques creuses de 15 cm d'épaisseur, avec un enduit en plâtre appliqué sur les deux faces. À l'intérieur de la cuisine et de la salle de bains, les murs sont couverts de céramique pour résister à l'utilisation de l'eau. Le plancher bas est constitué d'un béton d'une épaisseur de 10 cm, suivi de 10 cm en mortier de ciment et 4 cm de carrelage. La toiture est en béton-hourdi d'une épaisseur de 20 cm et est couverte d'une chape en mortier de ciment et d'un enduit intérieur en plâtre. Les caractéristiques de chaque zone indiquée dans le tableau 4-1 ci-dessous.

Tableau 4-1 Caractéristiques des zones et ses dimensions

Zones	Hauteur (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)
Chambre 1	3	5	4	20	60
Chambre 2	3	6	4	24	72
Séjour	3	8 et 4.5	4 et 2	41	123
Cuisine	3	5	4.5	22.5	67.5
WC	3	2	1	2	6
Salle de bain	3	3.5 et 1.5	1.5 et 1	6.75	20.25
SDB	3	3.5	2.5	8.75	26.25
Escalier	3	3.5	2	7	21
Total				132	396

4.2. Caractéristiques thermiques des matériaux

Nous avons les propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Tableau 4-2 Caractéristiques thermiques des matériaux (Hamdani, 2016) et (Trnsys16, 2016).

Matériaux	Epaisseur(<i>m</i>)	Conductivité thermique (<i>KJ/hmK</i>)	Chaleur spécifique (<i>KJ/kgK</i>)	Masse volumique (<i>kg/m3</i>)
Brique creuse	0,15	1,8	0,8	720
Brique creuse	0,10	1,8	0,79	720
Enduit plâtre	0,02	2,016	1	1400
Mortier Ciment	0,01	5,04	1	1800
Carrelage	0,025	6,14	0,875	2300
Béton	0,1	8, 64	0,8	2400
Béton-Hourdi	0,2	4,801	0,65	1300
Céramique	0,01	6,14	0,875	2300
Bois	0,03	0.504	2.5	500
Lame d'air	0,04	0.0936	1	1.2
Plastique	0.01	0.54	1.2	850

4.3. Détails des parois de l'enveloppe de l'habitat étudié

4.3.1. Murs extérieurs

Tableau 4-3 Matériaux constituant les murs extérieurs

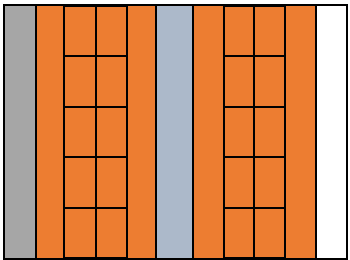
Plâtre	2 cm		
Brique creuse	10 cm		
Lame d'air	4 cm		
Brique creuse	10 cm		
Mortier Ciment	1 cm		

Figure 4-10 Schéma mur extérieur.

Tableau 4-4 Matériaux constituant les murs extérieurs de la cuisine et de la SDB

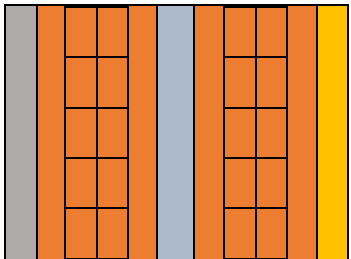
Céramique	1 cm		
Brique creuse	10 cm		
Lame d'air	4 cm		
Brique creuse	10 cm		
Mortier Ciment	1 cm		

Figure 4-11 Schéma du mur extérieur.

4.3.2. Murs intérieurs

Tableau 4-5 Matériaux constituant les murs intérieurs.

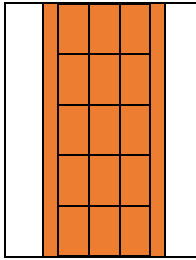
Plâtre	2 cm		
Brique creuse	15 cm		
Plâtre	2 cm		

Figure 4-12 Schéma du mur intérieur.

Tableau 4-6 Matériaux constituant les murs intérieurs de la cuisine et de la SDB

Céramique	1 cm	
Brique creuse	15 cm	
Plâtre	2 cm	

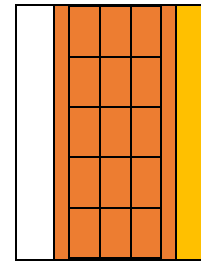


Figure 4-13 Schéma du mur intérieur.

Tableau 4-7 Matériaux constituant les murs intérieurs de la cuisine et de la SDB.

Céramique	1 cm	
Brique creuse	15 cm	
Céramique	1 cm	

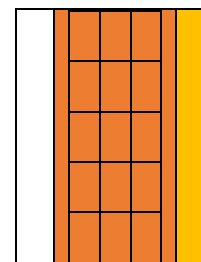


Figure 4-14 Schéma du mur intérieur.

4.3.3. Toiture

Tableau 4-8 Matériaux constituant les toitures.

Mortier	2 cm	
Ciment		
Béton	20 cm	
Hourdis		
Plâtre	1 cm	

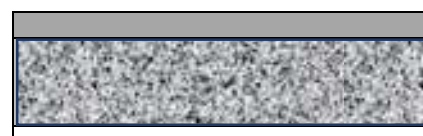


Figure 4-15 Schéma de la toiture.

4.3.4. Plancher bas

Tableau 4-9 Matériaux constituant le plancher bas.

Carrelage	2.5 cm	
Mortier	2 cm	
Ciment		
Béton	10 cm	



Figure 4-16 Schéma du Plancher bas.

5. Simulation du bâti

TRNSYS est un logiciel très simple pour modéliser les systèmes thermiques à plusieurs niveaux de complexité. Il permet l'accès au code source pour modifier des caractéristiques ou ajouter de nouveaux composants qui n'existent pas dans la librairie du logiciel.

5.1. La méthodologie de simulation

Dans notre projet, on cherche la consommation énergétique du cas de base, dans le but de mesurer l'efficacité énergétique de laquelle, on déduit la consommation énergétique.

Selon la réglementation thermique algérienne, les températures de confort pendant l'hiver (pour le chauffage), dans les chambres, sont de 21°C et 18°C pour les autres espaces (cuisine, salle de bain et couloir). La température est de 24°C pendant l'été (pour la climatisation), dans les chambres et 27°C pour les autres espaces (El Hassar et al., 2002) et (Imessad et al., 2017).

Les besoins thermiques contiennent les données caractéristiques du cas de base, à l'aide du TRNBuild et les données météorologiques, à l'aide du METEONORM.

Le pas de calcul est fixé à une heure pour chaque itération, nous lançons la simulation pour obtenir l'évolution de la température moyenne de l'air de chaque zone et on obtient les exigences énergétiques de chauffage et de climatisation.

Le logiciel TRNBuild régule le temps d'utilisation de chaque zone pour minimiser la consommation énergétique.

Le tableau 4-10 montre le temps d'utilisation des zones principales.

Tableau 4-10 Utilisation des zones pendant la semaine.

Jours	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
Zones							
Chambre 1	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-17h 20h-10h	12h-17h 20h-10h
Chambre 2	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-14h 20h-06h	12h-17h 20h-10h	12h-17h 20h-10h
Séjour	06h-08h 12h-14h 17h-22h	06h-08h 12h-14h 17h-22h	06h-08h 12h-14h 17h-22h	06h-08h 12h-14h 17h-22h	06h-08h 12h-14h 17h-22h	06h-22h	06h-22h
Cuisine	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h	06h-08h 10h-13h 16h-21h

5.2. Résultats de la simulation

La Figure 4-17 présente les variations annuelles de la température ambiante obtenues par le fichier METEONORM et affichées par TRNSYS.

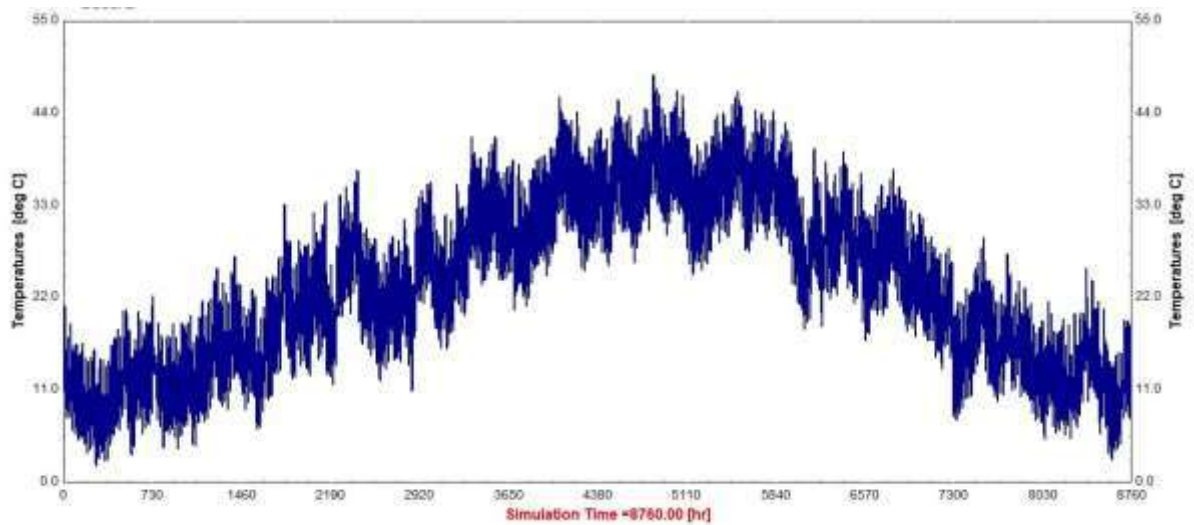


Figure 4-17 Variations annuelles horaires de température ambiante.

5.2.1. L'évolution annuelle de la température de chaque zone

Nous utilisons dans TRNSYS un système de réglage des sources d'énergie par temps (tableau 4-10), ce système commande la consommation énergétique (le temps occupé par les habitants représente 1 et le temps non occupé représente 0 (Figure 4-18)

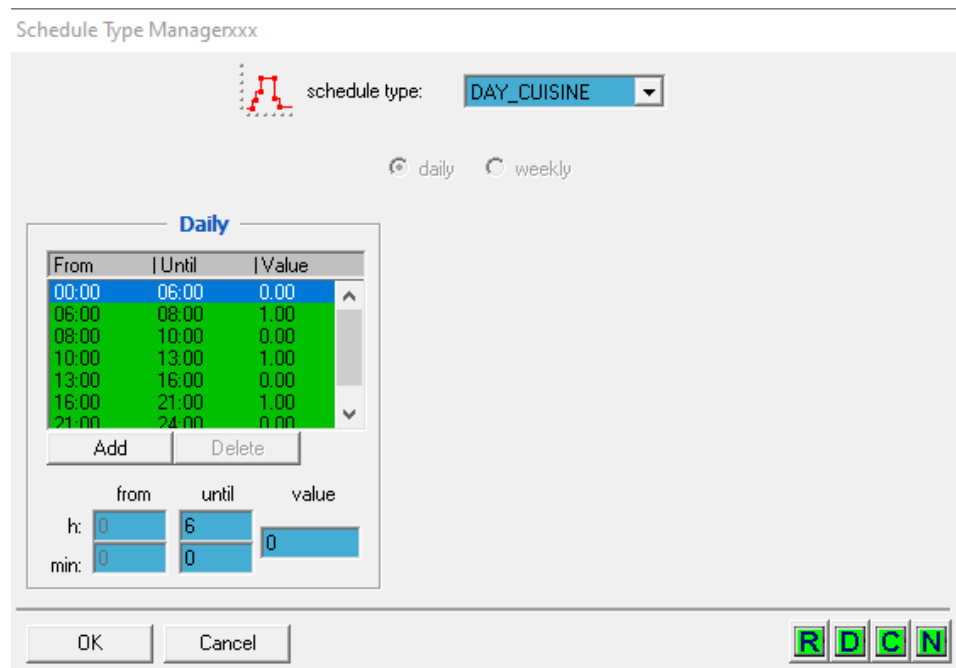


Figure 4-18 Schedule Type Manager System.

Ce système est appelé Schedule Type Manager. Dans ce système, on utilise les températures de la réglementation thermique algérienne et obtenons les résultats suivants :

a- Les chambres :

Les Figures 4-19 et 4-21 présentent les variations des températures annuelles, par heure, dans les deux chambres sans optimisation. Les Figures 4-20 et 4-22 présentent la température annuelle avec optimisation.

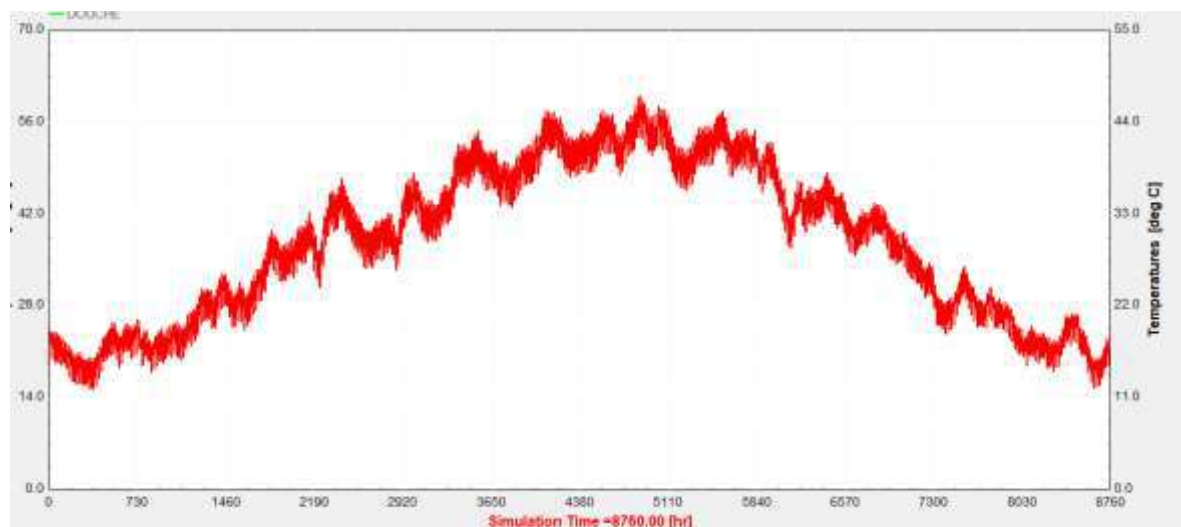


Figure 4-19 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 1 sans optimisation.

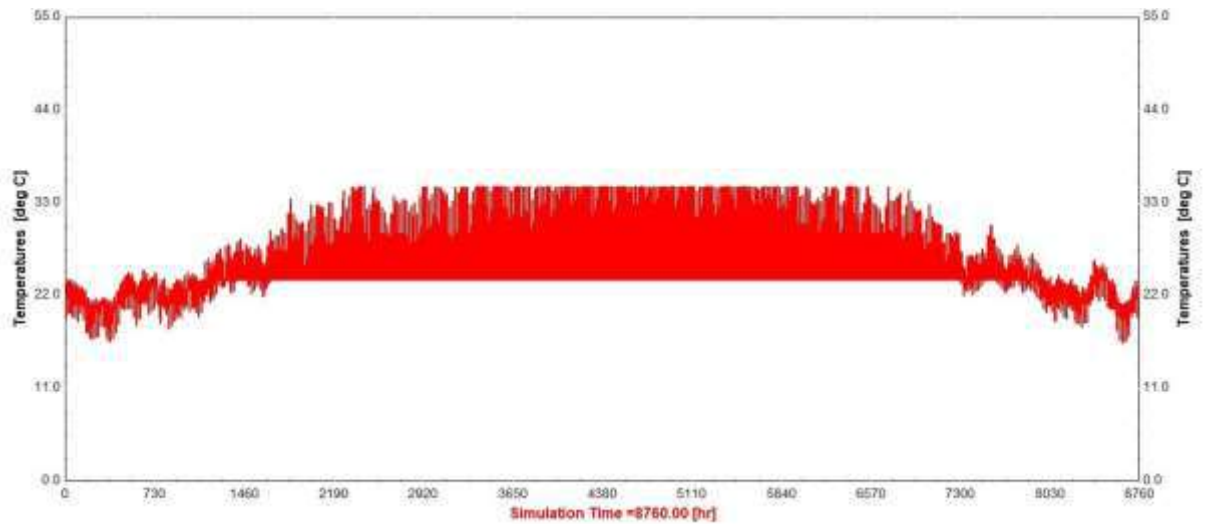


Figure 4-20 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 1 avec optimisation.

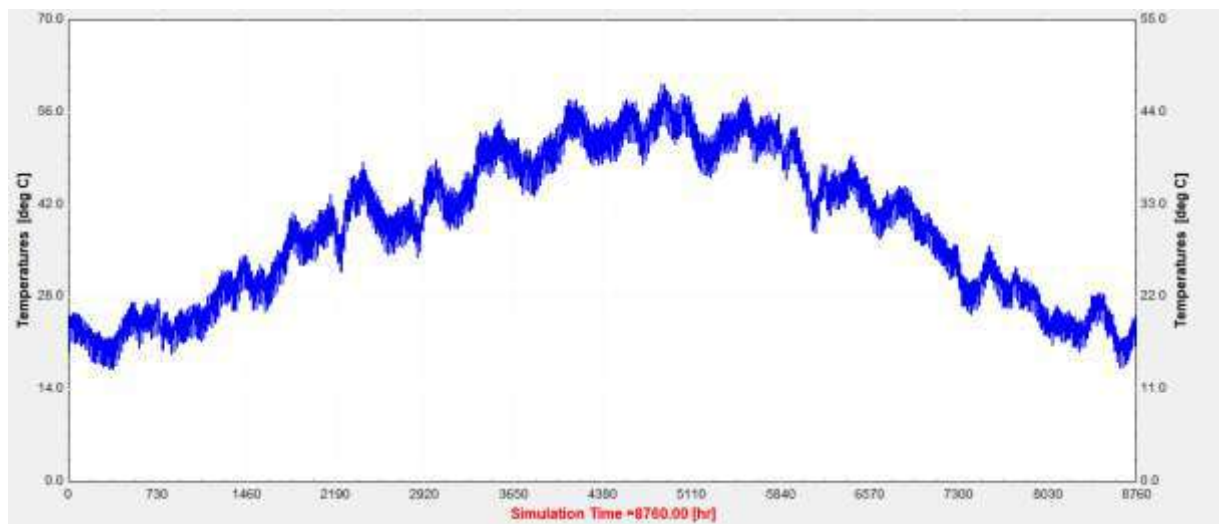


Figure 4-21 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 2 sans optimisation.

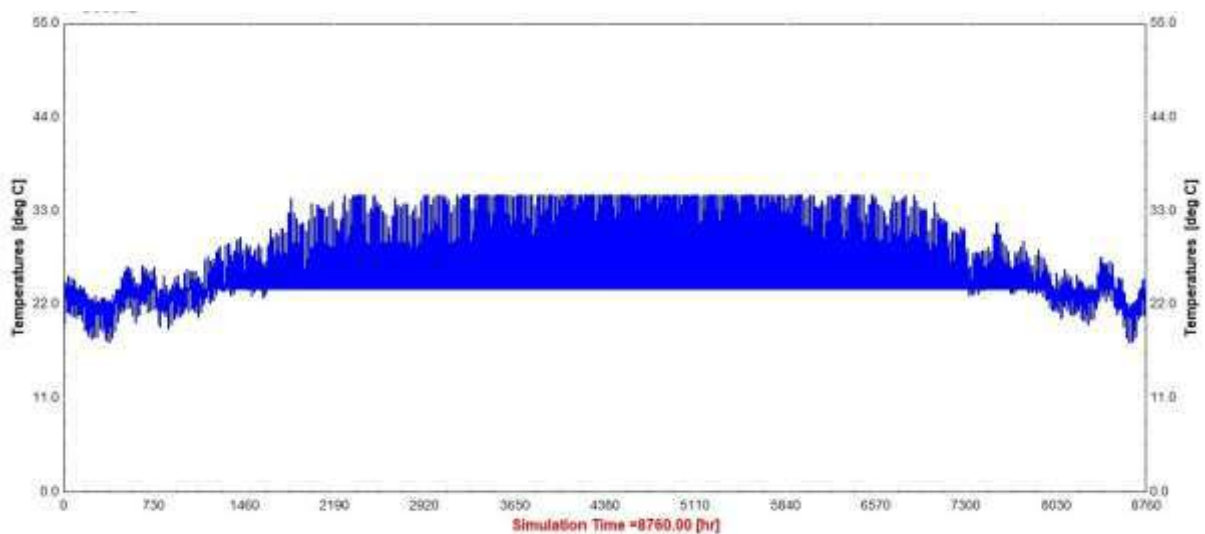


Figure 4-22 Variations annuelles horaires de la température dans la chambre 2 avec optimisation.

Dans les Figures sans optimisation, on remarque que la température est très élevée pendant l'été et dépasse 47°C et moins de 16°C durant l'hiver.

Les résultats avec optimisation indiquent que le max et le min de la température est limité, puisque dans les deux chambres, on a choisi la température de 24°C, représentée par 1 et 35°C, représentée par 0, pendant l'été, pour le refroidissement. Pour le chauffage, pendant l'hiver, on a choisi une température de 21°C, représentée par 1 et 14°C, représentée par 0.

Ce qui signifie que la température des deux chambres occupées par des personnes est 24°C en été et 21°C en hiver, par contre lorsqu'elles ne sont pas occupées la température est de 35°C en été et 14°C en hiver.

b- La cuisine

Dans la Figure 4-23 la température annuelle dans la cuisine, sans optimisation, est très élevée, pendant l'été et inacceptable en hiver.

La Figure 4-24 présente la température dans la cuisine. On remarque qu'une seule limite est dans le bas, puisque dans la cuisine, nous avons seulement besoin d'un refroidissement et compte tenu de la réglementation thermique algérienne, la température optimale dans la cuisine, pendant les saisons chaudes, est 27°C.

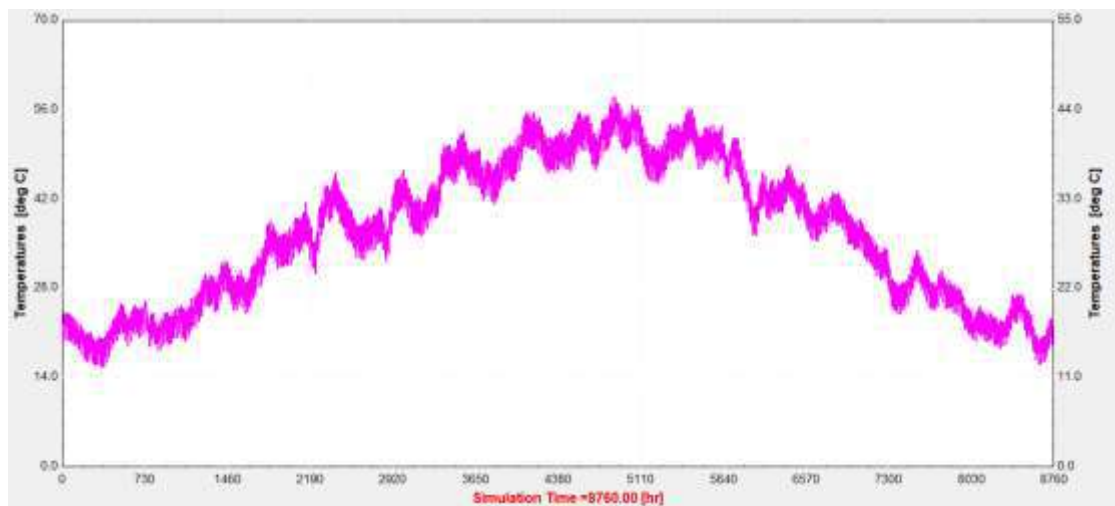


Figure 4-23 Variations annuelles horaires de la température dans la cuisine sans optimisation.

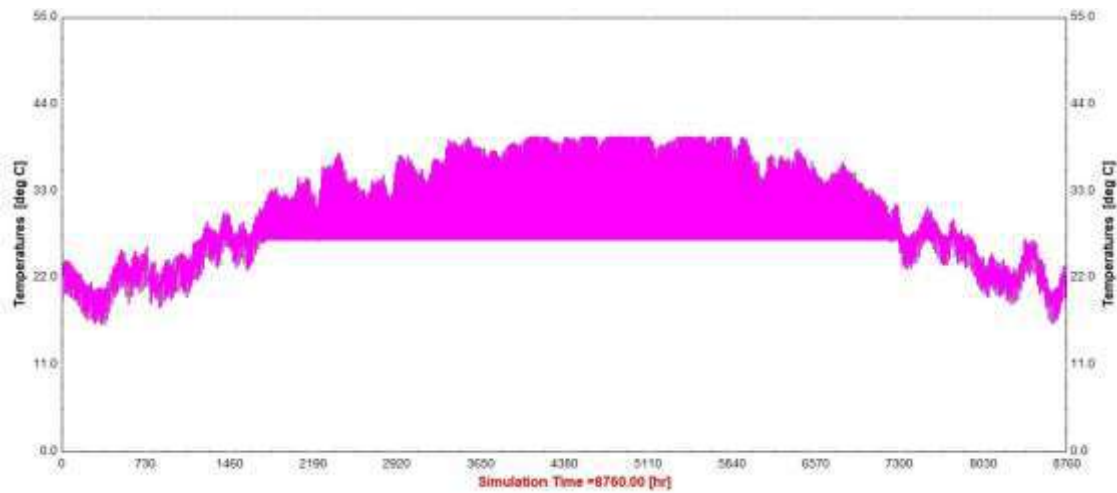


Figure 4-24 Variations annuelles horaires de la température dans la cuisine avec optimisation.

c- Le Séjour

Dans le séjour, le résultat n'est pas très différent des chambres mais le temps d'occupation diffère. Les Figures 4-25 et 4-26 présentent les résultats.

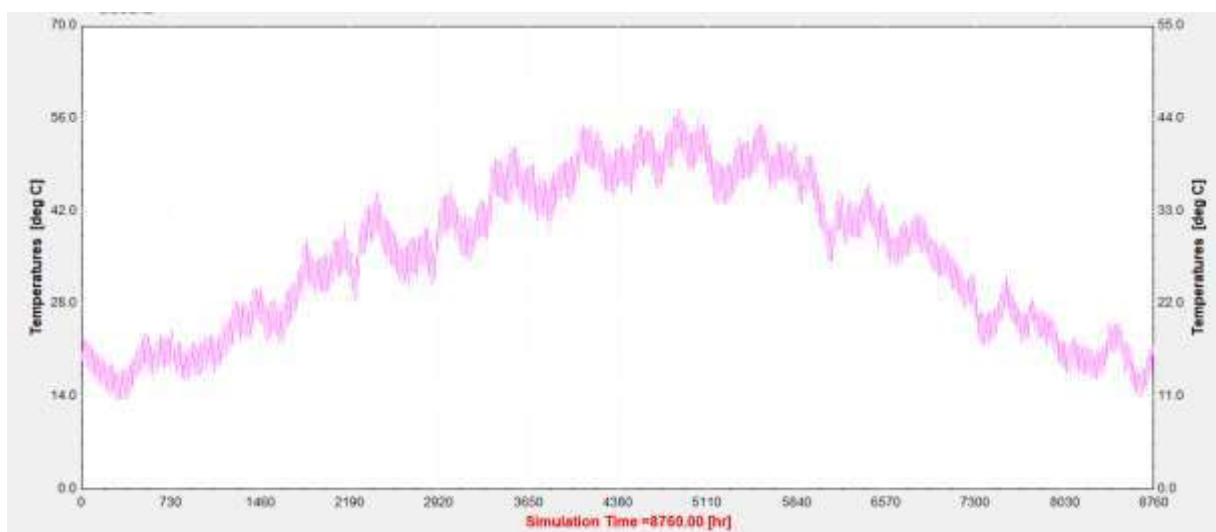


Figure 4-25 Variations annuelles horaires de la température dans le séjour sans optimisation.

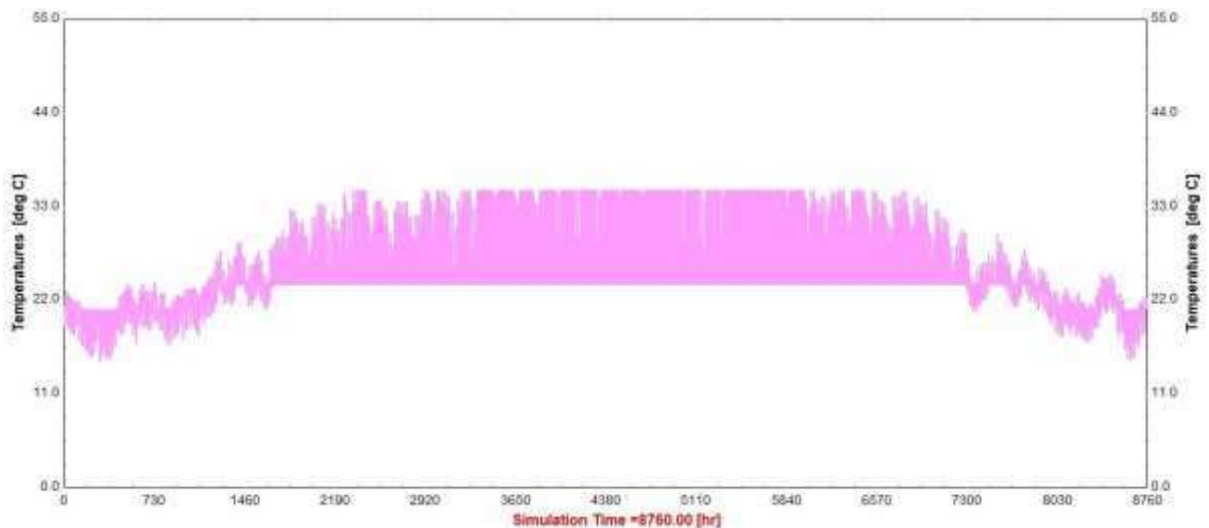


Figure 4-26 Variations annuelles horaires de la température dans le séjour avec optimisation.

Dans les autres zones, comme la salle de bain, les WC et l'espace d'escalier, nous n'utilisons aucune source d'énergie pour le refroidissement ou le chauffage, sauf de l'électricité pour l'éclairage.

5.2.2. Besoins énergétiques

Les besoins énergétiques de chaque zone et le besoin totale dans la région sont induits principalement par le refroidissement et dans une moindre mesure, par le chauffage.

a- Chambre 1

Les besoins énergétiques mensuels du chauffage et du refroidissement de la chambre 1 présente dans le tableau 4-11. Dans la Figure 4-27, on remarque que les mois d'été ont les plus grandes consommations d'énergie pour le refroidissement.

Tableau 4-11 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 1

Mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	TOT
Chauffage (kWh)	30,95	2,323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,89	52,16
Refroidissement (kWh)	7,413	67,56	401,4	626,5	946,6	1158	1340	1251	862,1	567,6	157,8	14,05	7400

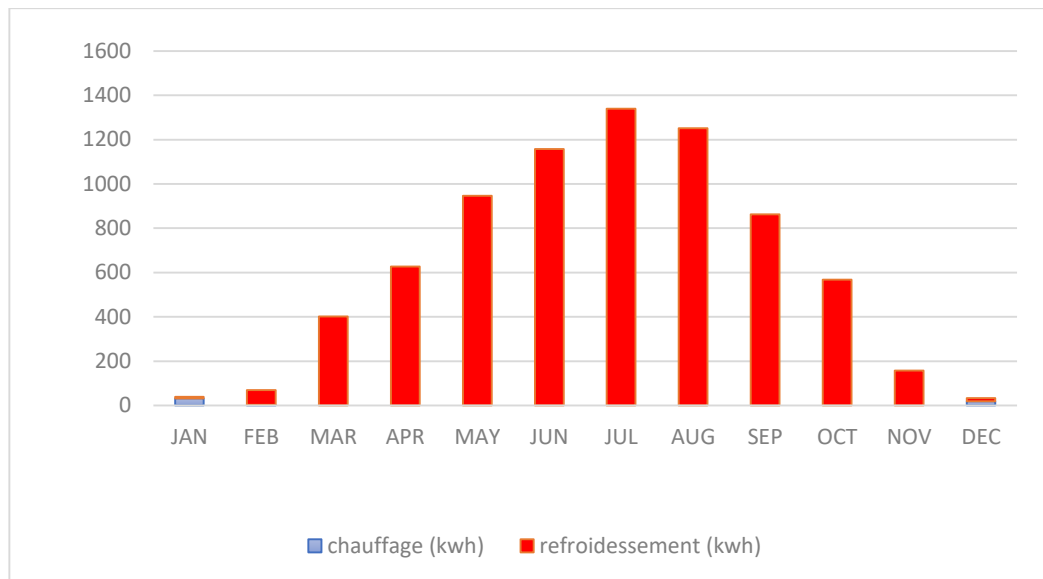


Figure 4-27 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 1.

b- Chambre 2

Les besoins énergétiques mensuels du chauffage et du refroidissement de la chambre 2 présente dans le tableau. Dans la Figure 4-28 on remarque les mêmes paramètres que pour la chambre précédente, où les mois à plus grande consommation sont juillet et aout, étant les mois de fortes chaleurs.

Tableau 4-12 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 2.

Mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	TOT
Chauffage (kWh)	10,56	0,2091	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,119	16,89
Refroidissement (kWh)	37,43	132,4	555,7	797,2	1155	1397	1618	1536	1095	757,6	282,3	54,42	9417

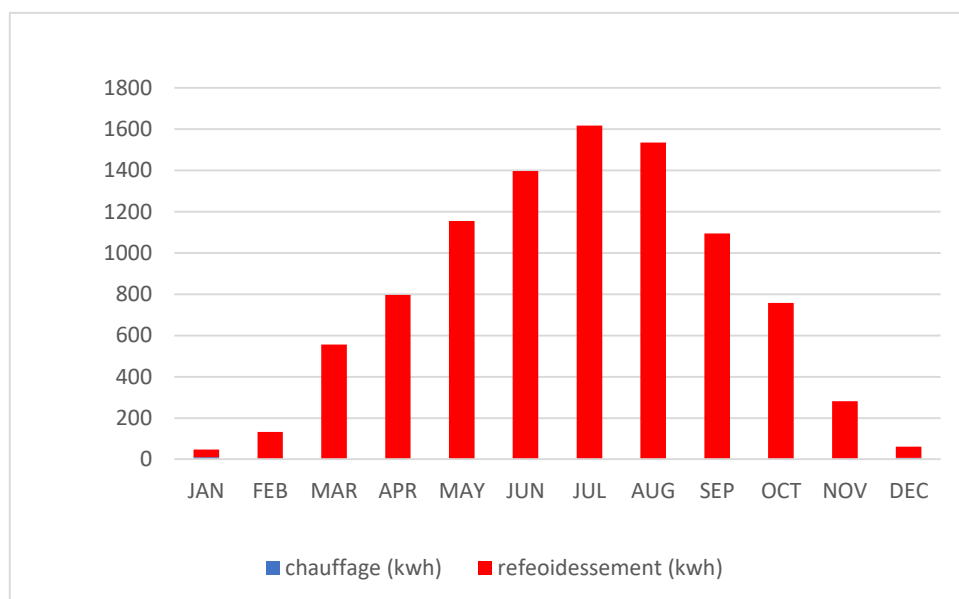


Figure 4-28 Besoins énergétiques mensuels de la chambre 2.

c- La cuisine

Le tableau 4-13 présente les besoins énergétiques mensuels du refroidissement de la cuisine. À travers la Figure 4-29, on constate que les mois de fortes consommations d'énergie sont toujours pendant l'été. La quantité d'énergie consommée dans la cuisine est moins élevée que dans les chambres à cause de la température optimale utilisable de la cuisine, (indiquée dans le paragraphe 5.1). Selon la réglementation thermique algérienne, les températures de confort de la cuisine sont de 18°C l'hiver et 24°C l'été.

Tableau 4-13 Besoins énergétiques mensuels de la cuisine.

Mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Tot
Chauffage (kWh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Refroidissement (kWh)	0	17,27	240,8	462	770	985	1226	1118	735,5	434,5	51,3	0,3619	6041

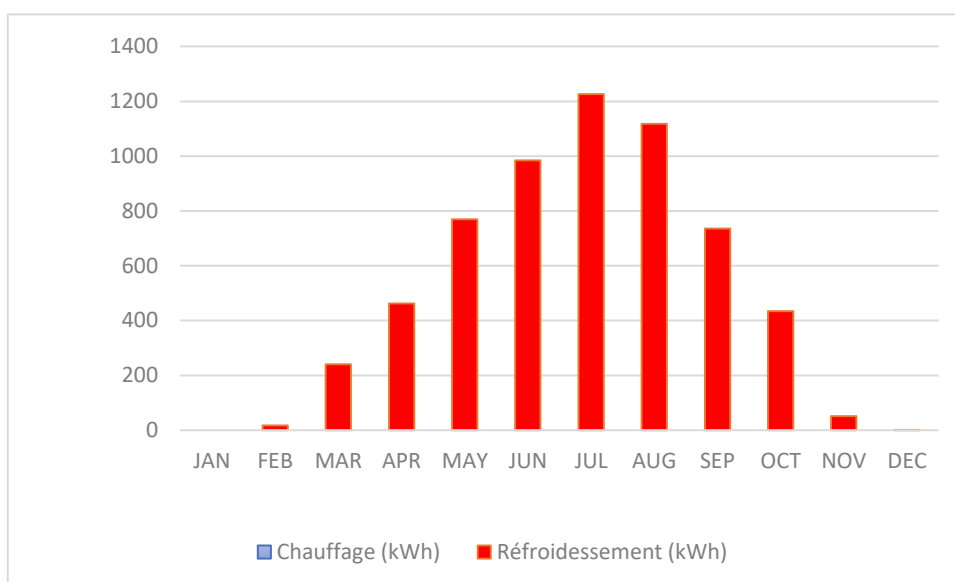


Figure 4-29 Besoins énergétiques mensuels de la cuisine.

d- Le séjour

Le tableau 4-14 présente l'énergie consommée dans le séjour pendant une année. La quantité d'énergie consommée est plus grande que les autres zones en raison de leur grand taux d'occupation. À partir de la Figure 4-30, on constate que l'énergie consommée pour couvrir le chauffage du séjour est considérable mais elle est faible par rapport à celle dépensée pour le refroidissement. L'énergie consommée durant le mois le plus chaud (juillet) atteint 2744 kWh.

Tableau 4-14 Besoins énergétiques mensuels du séjour.

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	TOT
Chauffage (kWh)	184,4	60,51	0,232	0	0	0	0	0	0	0	5,621	140,8	391,5
Refroidissement (kWh)	0,6385	68,84	624,5	1071	1763	2270	2744	2503	1628	967,8	173,2	5,33	13820

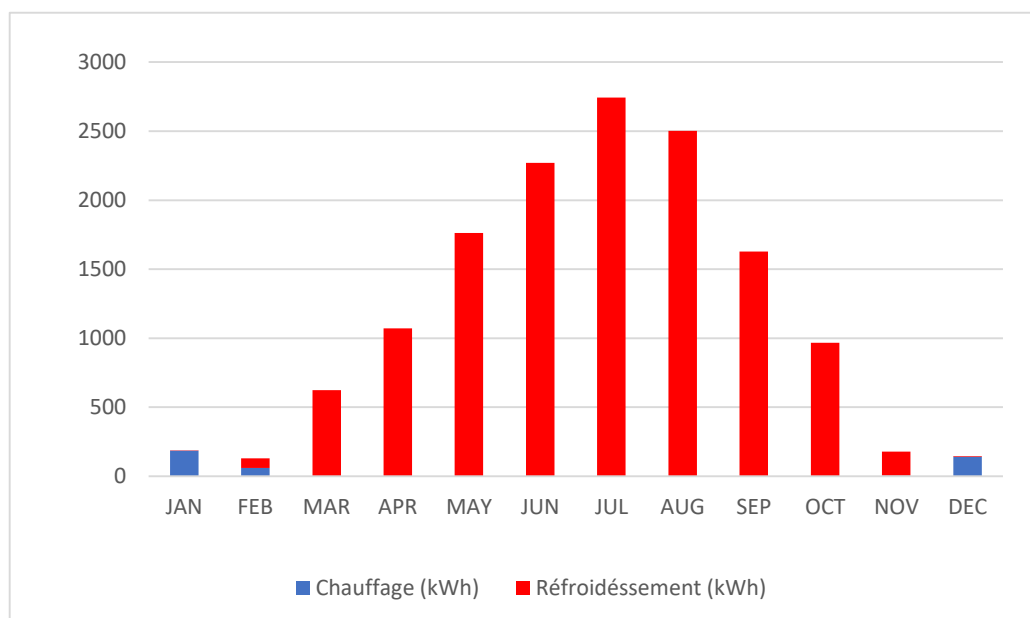


Figure 4-30 Besoins énergétiques mensuels du séjour.

e- Besoins énergétiques totaux

Les besoins énergétiques totaux, de conditionnement d'air, sont la somme des énergies consommées dans toutes les zones. Le tableau 4-15 et la Figure 4-31 montrent que le besoin énergétique totaux pour le chauffage est de 460.6 *KWh/an*, tandis que pour la climatisation, il s'élève à 36 680 *KWh/an*. Donc, le besoin total annuel est de 37 140,60 *KWh*, dont 98 % sont destinés à la climatisation.

Tableau 4-15 Besoins énergétiques mensuels totaux.

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	TOT
Chauffage (kWh)	225,9	63,04	0,232	0	0	0	0	0	0	0	5,621	165,8	460,6
Refroidissement (kWh)	45,48	286,1	1822	2957	4634	5810	6929	6408	4321	2728	664,6	74,16	36680

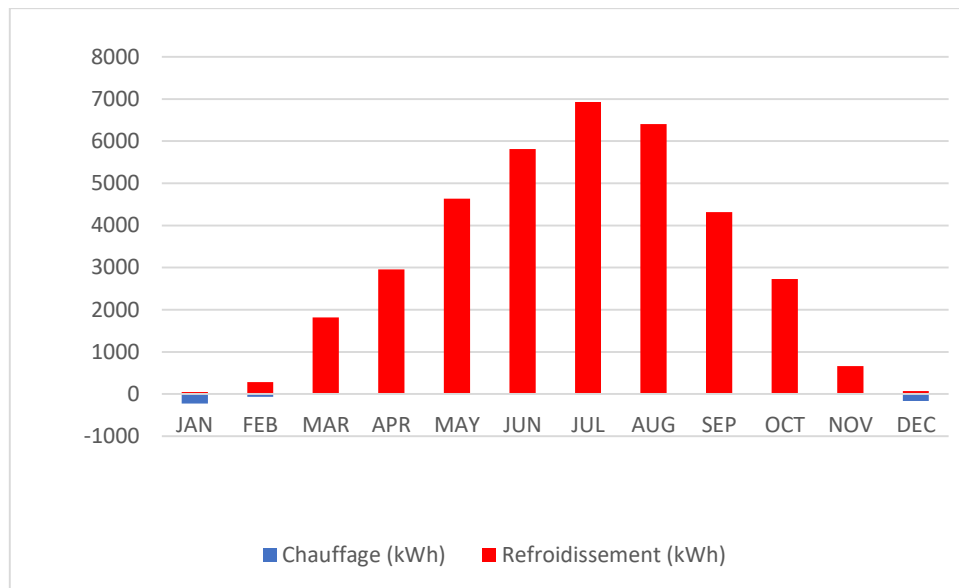


Figure 4-31 Evolution mensuelle des besoins énergétiques totaux.

Pour obtenir la performance énergétique, on divise le besoin total annuel par la surface de la maison. On obtient une valeur de l'ordre de $281,3681818 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, une simulation numérique est conduite pour évaluer l'évolution des besoins énergétiques, couvrant les consommations annuelles d'une maison, en fonction des mesures d'efficacité énergétique choisies. La maison est conçue sur la base des constructions conventionnelles et les données géographiques et météorologiques locales du site.

Le logiciel TRNSYS est utilisé pour simuler et déterminer les besoins énergétiques induits par la consommation annuelle habituelle. Les résultats montrent que pour une maison d'une superficie de 132 m^2 , les besoins énergétiques totaux sont de $37\,140,60 \text{ KWh/an}$, dont 98 % sont destinés à la climatisation.

En hiver, pendant la période ensoleillée, un système de chauffage par collecteurs hybrides PV/T peut assurer le chauffage de la maison. Pendant les nuits hivernales, de fort froid, le local semi-souterrain peut être utilisé.

En été, les besoins en climatisation sont considérables. Donc, pour réduire ces charges, les occupants doivent s'adapter, en plus des habitudes (décrites au chapitre 2), telles que l'utilisation des cours et le jardin de la résidence. Il restera, donc, quelques petites périodes d'utilisation des pièces du premier étage, où le refroidissement peut être assuré par un échangeur air-sol, qui fera l'objet d'un travail séparé.

Chapitre 5 Intégration des panneaux solaire

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse de l'optimisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour une production électrique efficace. Le but est la simulation d'un système photovoltaïque autonome sans et avec régulation afin de démontrer le gain en puissance apportée via la régulation ainsi que la robustesse du contrôle vis-à-vis des perturbations qui caractérisent cette source d'énergie (les générateurs photovoltaïques). Ce passage introduit les concepts fondamentaux des systèmes photovoltaïques, expliquant le principe de conversion photovoltaïque et les différents types de cellules photovoltaïques. La modélisation des caractéristiques électriques de ces cellules, incluant les effets de l'ensoleillement et de la température, y est également abordée. Enfin, la configuration de notre propre système est présentée en détail (système photovoltaïque autonome).

Et ce chapitre aussi contient le générateur PV, le convertisseur DC/DC Buck et la commande MPPT P&O. Finalement, nous traitons la régulation par la logique floue (MPPT flou). Nous exposons et discutons des résultats de la simulation avec et sans régulation permet d'énoncer des conclusions intéressantes.

2. Le système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque permet de transformer directement l'éclairement solaire en électricité. Grâce à des modules composés de cellules solaires, ou photopiles, qui réalisent cette conversion. L'adoption des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique a généré un intérêt pour l'étude approfondie de ces systèmes afin d'en maximiser les performances.

2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est une opération de transformation des photons solaires ou l'énergie émise, en électricité. Ce processus repose sur un semi-conducteur, appelé cellule solaire, qui effectue la conversion d'énergie grâce à une barrière de potentiel intégrée dans le matériau. Une barrière de potentiel se crée notamment à l'interface entre deux volumes de matériau semi-conducteur dopés différemment, c'est-à-dire lorsque des impuretés de types variés, par exemple de type P et N, sont introduites en concentrations distinctes. Sous exposition lumineuse, les charges électriques, rendues mobiles grâce à l'effet photoélectrique, sont dirigées de manière opposée par la barrière de potentiel, séparant les charges positives des charges

négatives. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus couramment utilisés figurent le silicium, le germanium, le sulfure de gallium, et l'arséniure de gallium (Radhia, 2018).

2.1.1. La jonction PN

La jonction PN est formée par l'association d'une région dopée de type P et d'une autre dopée de type N. Lors de cette assemblage, les porteurs de charges libres se combinent dans la zone de jonction, créant une région appauvrie en charges mobiles, appelée zone de transition. Dans cette zone, seuls les ions restent, générant un champ électrique entre les deux zones dopées au niveau de la jonction. Ce champ empêche les charges libres restantes de traverser la jonction, les empêchant ainsi de se recombiner (Ouarri Kada, 2015).

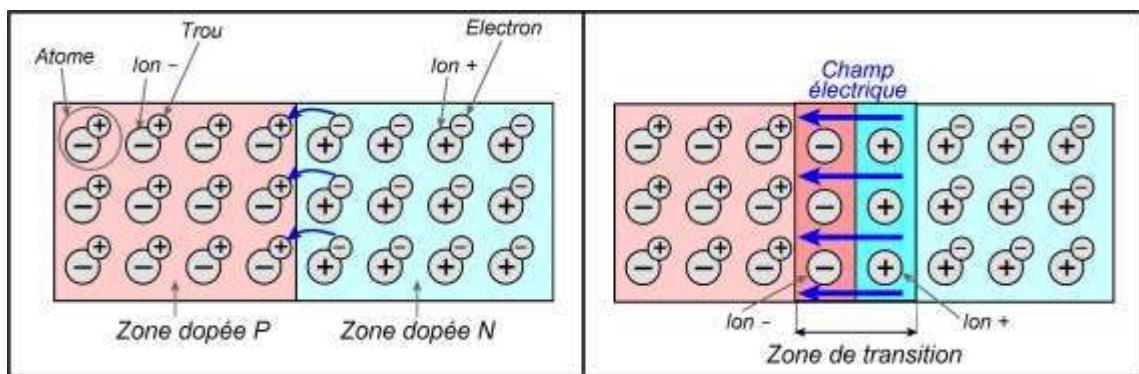


Figure 5-1 Jonction P-N d'un semi-conducteur.

L'extraction des charges au niveau de la jonction est rendue possible par le dopage du semi-conducteur.

Il existe deux types de dopage : le dopage de type N (négatif) et le dopage de type P (positif).

2.2. Principe de la conversion photovoltaïque

Certains matériaux ont la capacité de générer une faible quantité de courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ainsi, La lumière ne présente pas uniquement un caractère ondulatoire; son énergie est aussi véhiculée par des particules appelées photons (Soler, 1999).

L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad 5.1$$

h : la constante de Planck, **c** : la vitesse de la lumière et **λ** : la longueur d'onde.

Ainsi, « plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande ». Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905 (Stéphane Petibon, 2009).

La transformation de l'énergie solaire en électricité s'appuie sur l'effet photoélectrique, qui repose sur la capacité des photons à générer des porteurs de charge, tels que des électrons et des trous, dans un matériau. Lorsque un semi-conducteur est exposé à une lumière d'une longueur d'onde adéquate, l'énergie des photons absorbés facilite les transitions électroniques, permettant aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction du semi-conducteur, Figure 5-2 (Ouarri Kada, 2015).

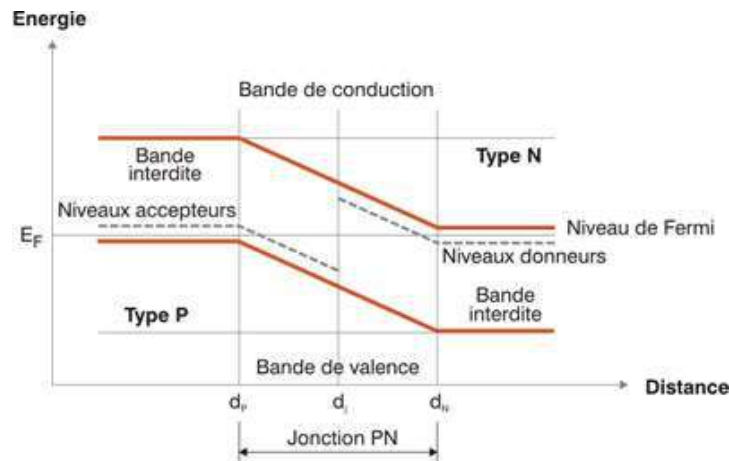


Figure 5-2 Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

Les cellules solaires sont des dispositifs qui transforment directement l'énergie solaire en électricité, en utilisant l'effet photovoltaïque. Elles peuvent également convertir l'énergie solaire de manière indirecte, en la transformant d'abord en chaleur ou en énergie chimique avant de produire de l'électricité. Les assemblages de cellules utilisées pour fabriquer des modules solaires qui sont utilisés pour capter l'énergie de la lumière du soleil, sont connus sous le nom de panneaux solaires. Les cellules sont décrites comme des cellules photovoltaïques lorsque la source lumineuse n'est pas nécessairement la lumière du soleil (lampe, lumière artificielle, etc....). La quantité d'énergie disponible à partir d'un appareil PV est déterminée par le type et la surface du matériau, l'intensité de la lumière du soleil, la longueur d'onde de la lumière du soleil (Swami, 2012).

Un panneau photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules solaires, et lorsque plusieurs panneaux sont connectés en série ou en parallèle, cela forme ce qu'on appelle un champ photovoltaïque qui sont présenté dans la Figure 5-3



Figure 5-3 les différents composants photovoltaïques (cellule, panneau, champ).

Il existe trois types des cellules solaires illustrés dans la Figure 5-4

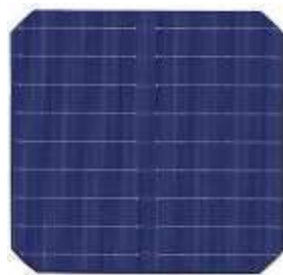


Figure 5-4 Cellule Monocristallin.

Cellule Monocristallin :

Ces cellules photovoltaïques représentent la première génération et sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Bien que leur processus de fabrication soit long et coûteux, elles offrent une efficacité supérieure à celle des cellules polycristallines.

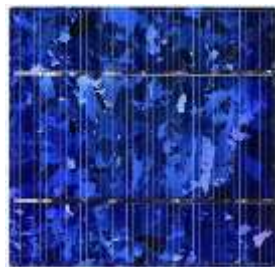


Figure 5-5 Cellule poly cristalline.

Cellule poly-cristalline : Fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé formé de plusieurs cristaux, ces cellules présentent un rendement inférieur à celui des cellules monocristallines. Toutefois, leur coût de production est également plus bas, ce qui les rend plus accessibles.



Figure 5-6 Cellule amorphe.

Cellule amorphe : Cette technologie utilise des couches minces, voire très minces, de silicium qui sont déposées sur des supports tels que le verre, le plastique ou le métal. Le coût de production de cette cellule est bien plus bas, mais leur rendement est aussi plus bas.

2.3. Modélisation d'une cellule solaire

Cette modélisation peut être exprimée de plusieurs façons dans des Logiciels tels que MATLAB, PSPICE, etc. et il existe de nombreuses méthodes pour représenter un modèle comme la modélisation mathématique de blocs, la programmation MATLAB intégrée et la modélisation de blocs physiques (Prakash et Singh, 2016).

Il existe deux cas de modélisation de la cellule solaire :

2.3.1. Cas idéal

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad 5.2$$

La Figure 5-7 illustre le schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire, où le courant I_{ph} , produit par l'interaction des photons, est représenté comme une source de courant.

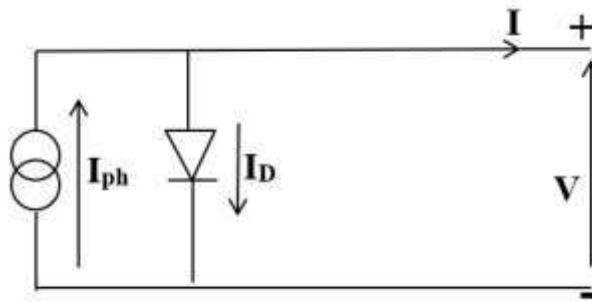


Figure 5-7 Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

I , V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_D : Courant de diode donnée par :

$$I_D = I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad 5.3$$

2.3.2. Cas réel

La performance d'une cellule solaire est affectée par deux phénomènes physiques, modélisés par deux résistances (R_s et R_p).

R_s (Résistance série) : Celle-ci résulte principalement des pertes d'énergie causées par l'effet Joule à travers les grilles de collecte, de la résistance propre des matériaux semi-conducteurs, ainsi que des imperfections de contact entre le semi-conducteur et les électrodes.

R_p (Résistance parallèle ou Shunt) : Cette résistance est associée aux pertes dues aux recombinaisons des porteurs de charge, influencées par l'épaisseur de la cellule, les effets de surface et les non-idéalités de la jonction (Kety et al., 2016).

Le schéma équivalent mis à jour, intégrant les pertes dues aux résistances série (R_s) et parallèle (R_p), est illustré dans la Figure 5-8.

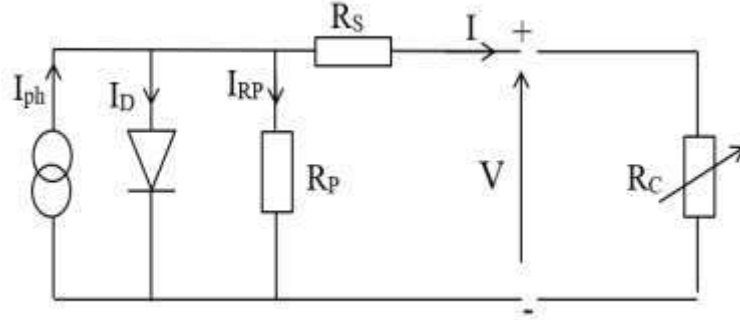


Figure 5-8 Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

Après l'application de la loi de Kirchhoff, nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad 5.4$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

I_{ph} : photo courante, il est proportionnel au flux incident et s'écrit ainsi dont l'expression est :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp} \quad 5.5$$

I_{Rp} : courant traversant R_p , si R_p est très grande il devient très faible :

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad 5.6$$

I_D : Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad 5.7$$

En remplaçant dans (5.5) les équations (5.6) et (5.7), l'équation résultante devient (Khenfer et al., 2020) :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad 5.8$$

2.4. Caractéristique d'un module solaire

Dans les Figures (5-9) et (5-10) nous avons respectivement les caractéristiques I, V et P, V du générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques standard ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$).

Les courbes du générateur photovoltaïque passent par trois points importants :

- un courant de court-circuit I_{cc}
- une tension de circuit ouvert V_{oc} (dans ce cas $V_{oc}=350\text{ V}$)
- une puissance maximale MPP (Maximum Power Point)

Pour tirer le maximum d'énergie du GPV (générateur photovoltaïque), il faut placer sur le point maximal de puissance MPP. Il est important de noter que certains régulateurs solaires effectuent une adaptation d'impédance, garantissant que le système fonctionne en permanence près du point de puissance maximale $P_{\max}$ (Stéphane Petibon, 2009).

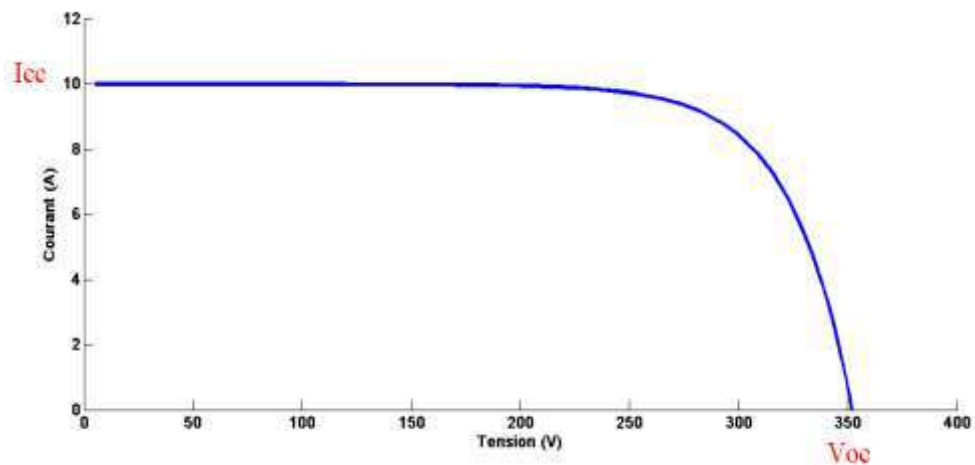


Figure 5-9 Caractéristique (I.V) d'un générateur photovoltaïque.

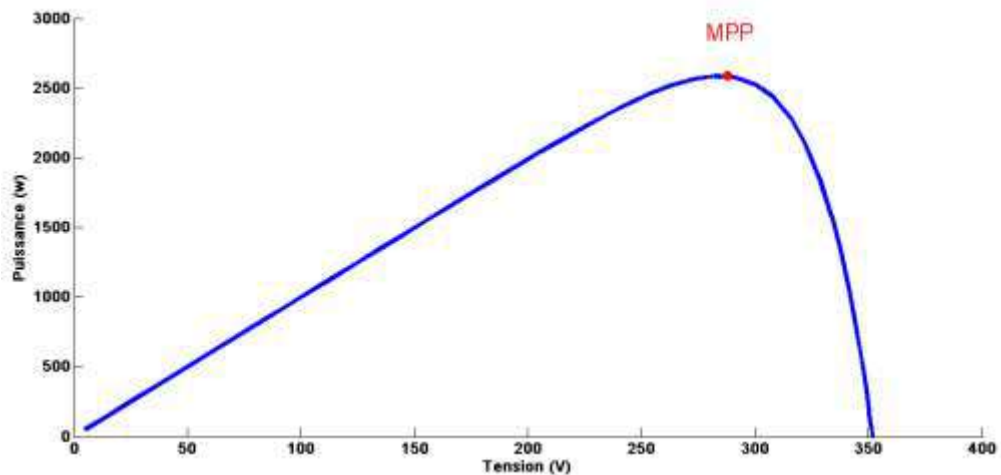


Figure 5-10 Caractéristique (P.V) d'un générateur photovoltaïque.

2.5. Système Photovoltaïque autonome

Le système photovoltaïque autonome répond aux besoins électriques dans les sites aride ou isolé qui n'ont pas accès aux réseaux. Dans notre projet, nous avons besoins d'un Générateur Photovoltaïque associe à une charge par l'intermédiaire d'un convertisseur contrôlé comme montre la Figure 5-11.

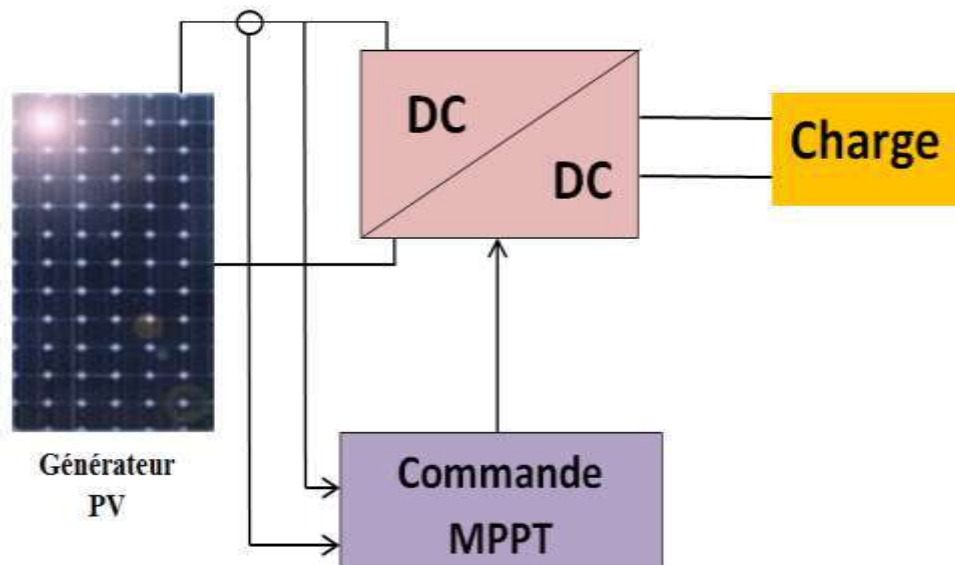


Figure 5-11 Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) (Messaoudi et al. 2018).

Le système PV autonome est composé principalement de : Générateur photovoltaïque, un système de régulation (commande MPPT), Convertisseur DC/DC (Hacheur) et une charge (Messaoudi et al. 2018).

2.5.1. Générateur photovoltaïque

La Figure 5-12 présente un modelé de Générateur PV crée sous SIMULINK basée sur les équations 5.4-5.8. C'est le composant le plus important de système photovoltaïque. C'est l'élément qui produit l'électricité en état continue (DC).

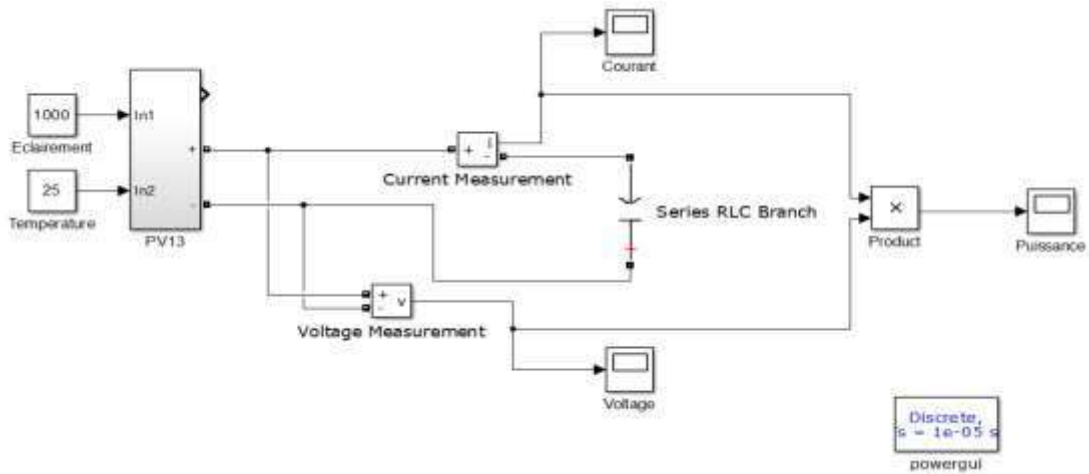


Figure 5-12 Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

2.5.2. Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les convertisseurs statiques continu-continu, appelés hacheurs, permettent de transférer l'électricité entre deux sources de courant continu en fournissant une tension continue en sortie à partir d'une tension continue en entrée). La Figure 5-13 montre le schéma synoptique d'un hacheur (Jaafar, 2013).

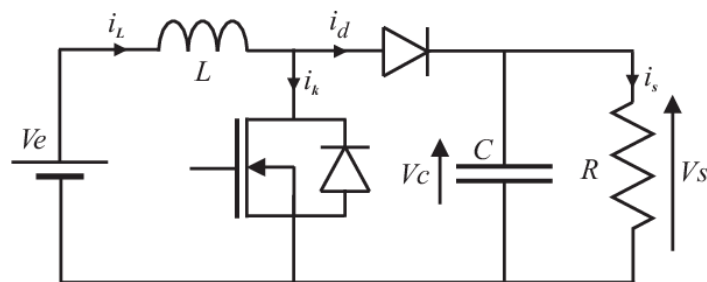


Figure 5-13 Schéma du Convertisseur DC/DC.

On a deux types de l'hacheur :

la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, l'hacheur est dit dévolteur, abaisseur ou Buck (Kapri, 2020).

Ou la tension délivrée en sortie est supérieure à la tension appliquée en entrée, il est dit survolteur ou élévateur ou Boost (Kapri, 2020).

Dans notre simulation, nous utilisons l'hacheur BUCK. Cette dénomination est liée au fait que la tension moyenne à la sortie est moindre que celle à l'entrée. La Figure 5-14 présente le modèle du convertisseur Buck créé sous MATLAB-SIMULINK.

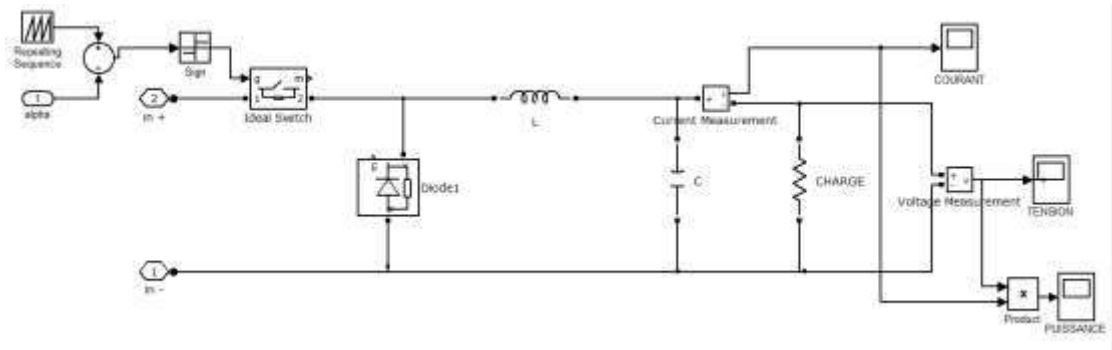


Figure 5-14 Schéma de convertisseur DC/DC Buck en MATLAB-SIMULINK.

Le principe de fonctionnement d'un hacheur se base sur deux états de l'interrupteur : l'état passant et l'état bloqué.

2.5.3. La commande MPPT

La chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque est toujours associée à une commande MPPT, comme la chaîne présentée dans la Figure 5-11. L'abréviation MPPT (Maximum Power Point Tracking) signifie suivre le point de puissance maximale (Abada, 2011). Pour avoir la meilleure connexion entre le GPV et la charge, et produire la meilleure puissance, (MPPT) a été développé depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système.

2.5.4. Types d'algorithme de MPPT

L'algorithme MPPT existe par plusieurs méthodes : les algorithmes très connus dans les systèmes d'optimisation sont :

- Algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- Algorithmes de la conductance incrémentale (IC).
- Algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage).
- Algorithmes de tension en circuit ouvert fractionnaire (FOCV : Fractional Open-Circuit Voltage) (Mnati et al., 2019).

Notre étude examine les bases théoriques de la méthode de perturbation et observation (P&O), Parce qu'il est le plus utilisé dans le domaine des panneaux solaires. Dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, l'algorithme le plus utilisé est, perturbe et observe (P&O). Dans notre étude, nous présentons le fondement théorique de cet algorithme.

2.5.5. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Est une algorithme très exploité et citée par des différents auteurs. Le principe de cet algorithme se base sur le calcul d'une valeur actuelle de la puissance et de la valeur précédente.

C'est un algorithme permet de faire la comparaison des deux puissances aux différents points successifs situés sur la courbe pour décider d'incrémenter ou décrémenter le rapport cyclique α (Benamara, 2012).

Le rapport cyclique α : ce rapport défini comme le temps τ pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période T_s de commutation de l'interrupteur de l'hacheur avec une fréquence F . Il varie entre 0 et 1 (Madheswaran et Muruganandam, 2012).

Il s'exprime comme suit

$$\alpha = \frac{\tau}{T_s} \quad \tau = \alpha T_s \quad T_s = 1/F \quad 5.9$$

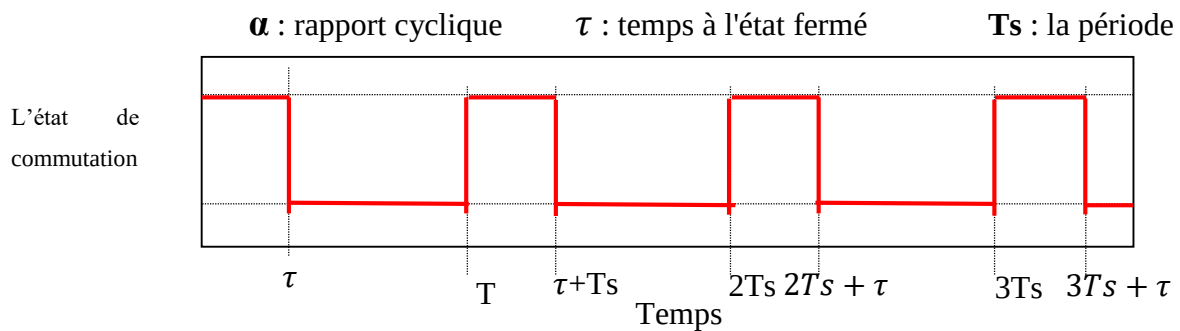


Figure 5-15 La forme de variation en fonction du rapport cyclique.

Le Tableau 5-1 présente les fonctionnements de l'algorithme P&O

Tableau 5-1 Fonctionnement de l'algorithme P&O.

Cas	Dp	dV	Action
1	$P(n) > P(n-1)$	& $V(n) > V(n-1)$	+
2	$P(n) > P(n-1)$	& $V(n) < V(n-1)$	-
3	$P(n) < P(n-1)$	& $V(n) > V(n-1)$	-
4	$P(n) < P(n-1)$	& $V(n) < V(n-1)$	+

Les fonctionnements du tableau sont réalisés dans la Figure 5-16.

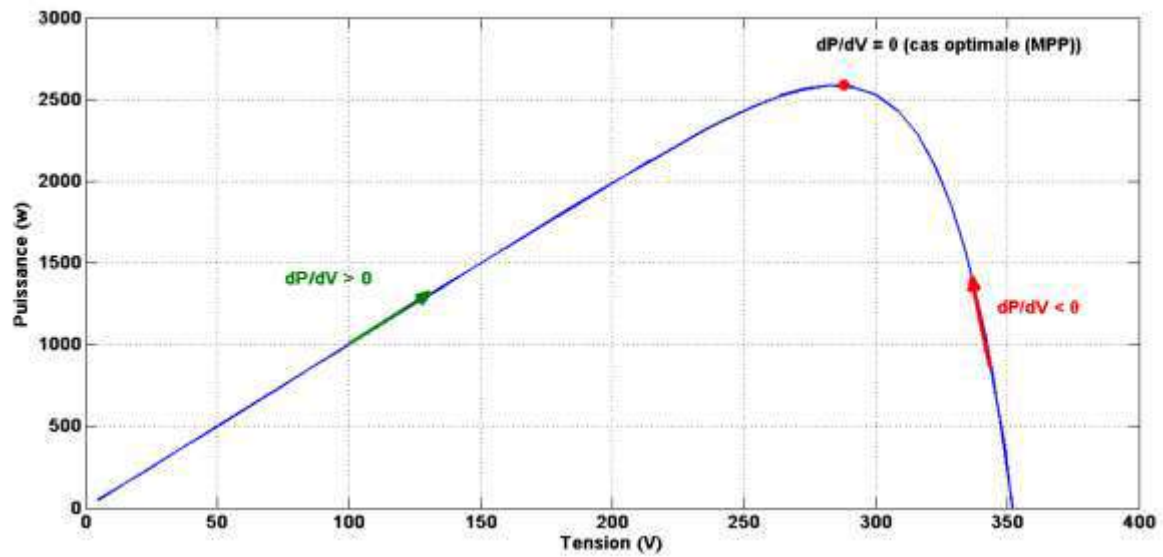


Figure 5-16 Caractéristique de puissance dans l'algorithme P&O.

Le changement d'un point « n » à un point suivant « n+1 » se fait avec un pas constant (méthode mathématique déterministe).

La Figure 5- 17 représente l'organigramme de l'algorithme de la méthode P&O:

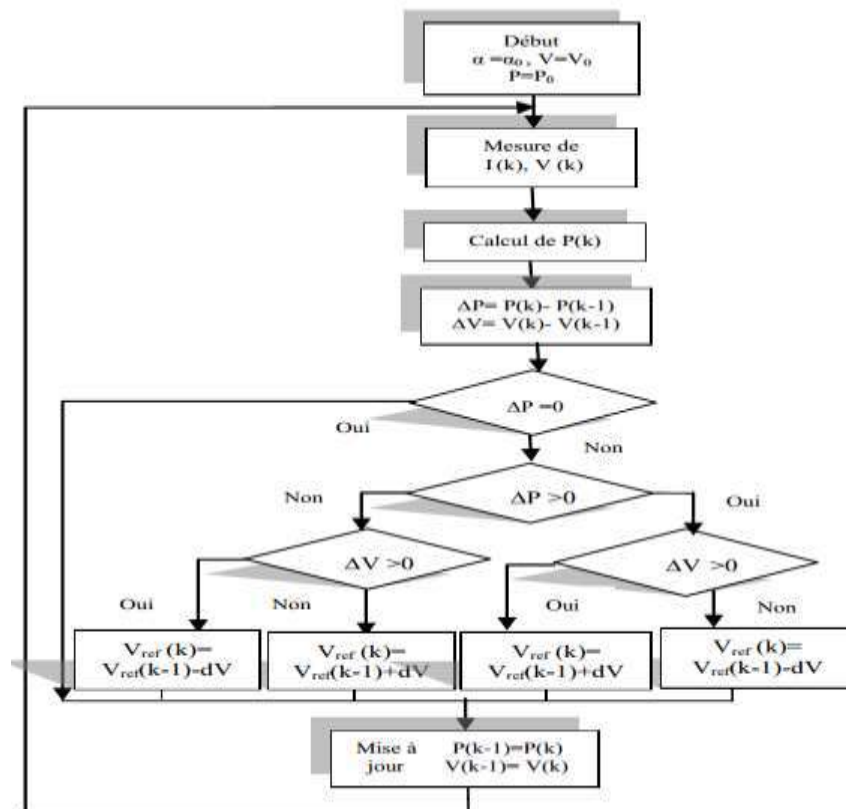


Figure 5-17 Organigramme de la méthode Perturbe & Observe.

À partir les Figures 5-16, 5-17 et le tableau 5-1 peut être synthèse un Schéma de la commande MPPT P&O à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK. la Figure 5-18 montre ce schéma :

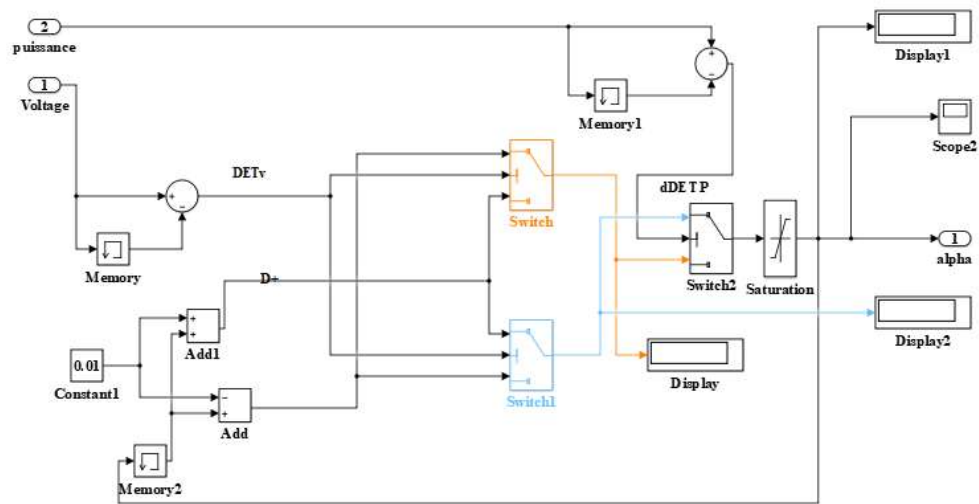


Figure 5-18 MPPT P&O en MATLAB-SIMULINK.

3. La logique floue

La logique floue peut être présentée comme une généralisation d'une logique classique. La logique floue a été développée en 1965 par Lotfi A. Zadeh, professeur d'informatique à l'Université de Californie à Berkeley. Il a été conçu pour résoudre des problèmes liés à des données imprécises et où les règles de dérivation sont formulées de manière très incertaine (Povolotskaya, 2017 et Rojas, 1996).

La base du développement de la logique floue sont les composants de la pensée humaine ne sont pas des nombres. Ce sont plutôt des termes linguistiques qui ne sont pas définis avec précision. Les termes linguistiques peuvent également être appelés ensemble flous (Povolotskaya, 2017).

Il n'est pas toujours possible de renvoyer certainement un objet particulier à un groupe particulier, les données varient selon l'opinion des experts. De tels cas sont en observation de logique floue (L A Zadeh, 1974).

3.1. Principe de la logique floue

La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique à valeurs multiples. Ses utilisations et objectifs sont cependant assez différents. Ainsi, le fait que la logique floue traite de modes de raisonnement approximatifs plutôt que précis implique que, en général, les chaînes de raisonnement en logique floue sont courtes. En un mot, dans la logique floue, tout, y compris la vérité, est une question de degré. Le plus grand pouvoir expressif de la

logique floue provient du fait qu'elle contient comme cas spéciaux non seulement les systèmes logiques classiques à deux valeurs et à valeurs multiples, mais aussi la théorie des probabilités et la logique probabiliste (Lotfi A. Zadeh, 1988).

Dans les systèmes logiques à deux valeurs, une proposition soit vraie ou fausse. Dans les systèmes logiques à valeurs multiples, une proposition peut être vraie ou fausse ou avoir une valeur de vérité intermédiaire, qui peut être un élément d'un ensemble de valeurs de vérité fini ou infini. En logique floue, les valeurs de vérité sont autorisées à s'étendre sur les sous-ensembles flous (Lotfi A. Zadeh, 1988).

Pour simplifier le principe de la logique floue, prenons un exemple simple lié à la température de l'eau de douche. En logique classique, nous réagirions de manière binaire, en percevant l'eau comme soit froide, soit chaude. Autrement dit, en augmentant progressivement la température, nous passerions de 'froide' à 'chaude' de manière abrupte, sans étapes intermédiaires, (Figure 5-19).

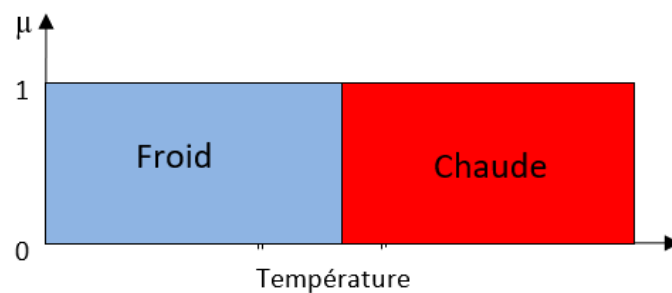


Figure 5-19 Classification selon la logique classique(booléenne).

Mais on aurait plutôt tendance à dire : l'eau est un « un peu moins froide », l'eau est « tiède », l'eau est « bientôt chaude », etc. On voit déjà ici que l'ensemble des possibles est bien plus large que le premier ensemble binaire dont on a parlé, (Figure 5-20).

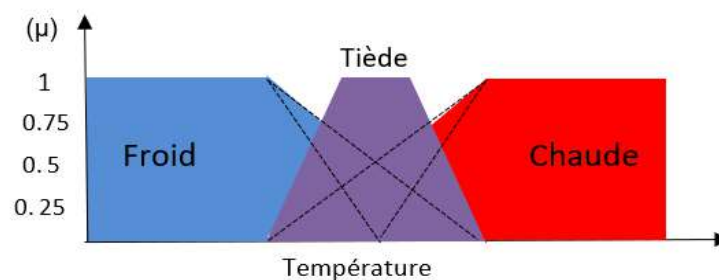


Figure 5-20 Classification selon la logique Floue.

Un deuxième exemple très simple de la vitesse de votre voiture sur l'autoroute. Si on raisonnait encore en logique classique, on pourrait dire par exemple : Si tu roules à moins de 100 km/h (votre repère de la vitesse), tu roules lentement et si tu roules à plus de 100 km/h, tu roules vite. C'est un raisonnement simple ou limité. Ça voudrait dire qu'à partir du moment où vous dépassez les 100 km/h, tout d'un coup, vous vous mettez à rouler vite. (Figure 5-21)

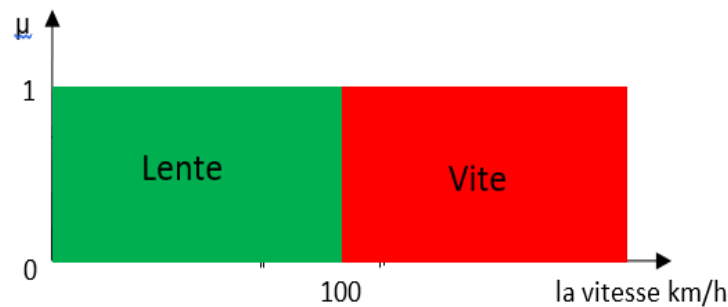


Figure 5-21 Classification selon la logique classique(booléenne).

Je suppose que le cerveau humain ne pense pas comme ça. Les humains se fonctionnent beaucoup plus par les détails et par transition, et c'est le principe de la logique floue. Dans cet exemple, le roulage par une vitesse au-dessous de 60 km/h on dirait plutôt qu'on roule lentement, le roulage par une vitesse au-dessus de 120 km/h est un roulage vite, et entre les deux vitesses on n'est ni lent, ni rapide, on est un peu des deux en quelque sorte (Figure 5-22).

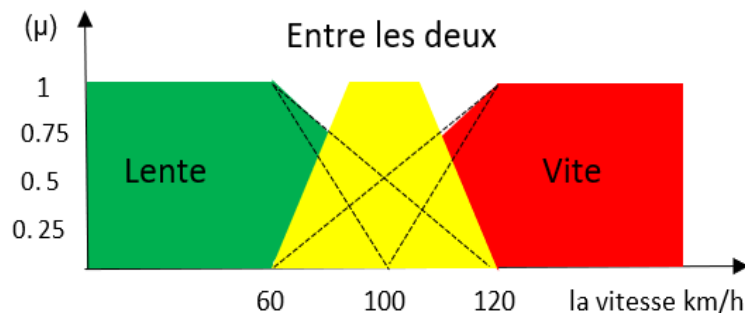


Figure 5-22 Classification selon la logique Floue.

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques et les ensembles flous, les fonctions d'appartenance μ .

3.2. Variable linguistique

Dans une partition floue classique, chaque ensemble flou est associé à un concept linguistique tel que "très faible", "faible", "moyen", "élevé" ou "très élevé". Lors du processus de raisonnement, les variables sont représentées par ces termes linguistiques, tandis que les

ensembles flous définissent leur correspondance avec des valeurs numériques spécifiques. L'expression imprécise d'une situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique repose sur des descriptions relatives ou floues. Ces différentes catégories d'expressions floues, appelées ensembles flous, constituent ce que l'on désigne par des variables linguistiques. Pour permettre un traitement numérique de ces variables linguistiques, il est nécessaire de les formaliser à l'aide de fonctions d'appartenance. Ces fonctions permettent d'évaluer le degré de validité des variables linguistiques en fonction des différents sous-ensembles flous auxquels elles appartiennent (L A Zadeh, 1974 et Lotfi A. Zadeh, 1988).

3.3. La fonction d'appartenance μ

Dans la mathématique, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou est une généralisation de la fonction d'indicateur pour les ensembles classiques. Les degrés de vérité sont souvent confondus avec les probabilités, bien qu'ils soient conceptuellement distincts, car la vérité floue représente l'appartenance à des ensembles définis de manière floue. Lotfi Zadeh a introduit la fonction d'appartenance sur les ensembles flous en 1965. Dans sa théorie des ensembles flous, a proposé d'utiliser une fonction d'appartenance (avec une plage couvrant l'intervalle (0,1)) opérant sur le domaine de toutes les valeurs possibles (Novák et al., 1999).

Le degré d'appartenance est représenté par une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1. Cette fonction est généralement notée par le symbole « μ », qui est largement utilisé dans ce contexte. Et l'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue (température, vitesse, force, quantité, etc.), (Baghli, 1999).

Les formes les plus couramment utilisées pour une fonction d'appartenance sont les formes trapézoïdales et triangulaires. L'équation suivant présente la valeur du degré d'appartenance en fonction de la variation du variable floue.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} & \text{si } x_1 \leq x \leq x_2 \\ \frac{x-x_3}{x_2-x_3} & \text{si } x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad 5.10$$

Ces formes, parmi les plus simples, sont constituées de segments de droites définis par morceaux. La forme trapézoïdale est entièrement caractérisée par quatre points, tandis que la forme triangulaire l'est par trois points (Figure 5-23).

Dans ce cas nous choisissons la forme triangulaire

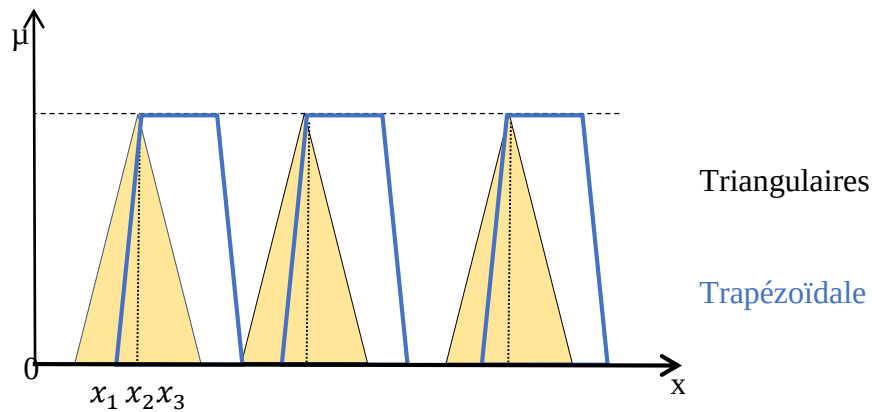


Figure 5-23 Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

3.4. Les régulateurs flous

En général, la logique floue est présentée en trois étapes principales : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Messaoudi et al., 2021).

La Figure 5-24 présente le schéma synoptique de base de l'algorithme flou.

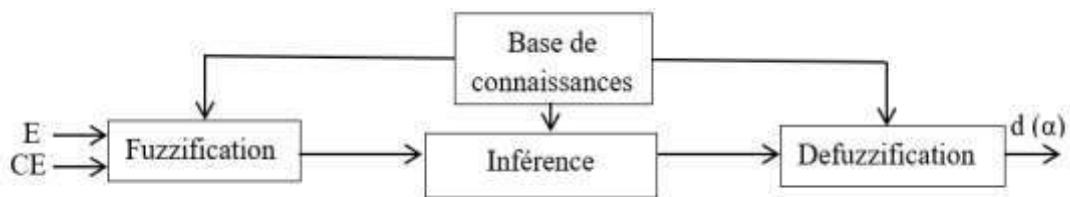


Figure 5-24 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

3.4.1. La fuzzification

Dans la logique floue, l'objectif principal de la fuzzification est de définir précisément les fonctions d'appartenance associées aux différentes variables linguistiques. Cela permet de convertir les variables d'entrée en variables floues ou linguistiques. Une étape préliminaire essentielle consiste à établir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrée, afin de guider leur transformation en termes flous. Ainsi, la fuzzification traduit les données numériques en représentations linguistiques floues, facilitant leur traitement dans le cadre du raisonnement flou (Ayache et al., 2010).

Dans notre cas, nous considérons deux variables d'entrée : l'erreur $E(t)$ et la variation de l'erreur $CE(t)$ à l'instant t . Ces variables sont définies comme suit :

$$E(t) = \frac{P_{pv}(t) - P_{pv}(t-1)}{V_{pv}(t) - V_{pv}(t-1)} \quad 5.11$$

$$CE(t) = E(t) - E(t - 1) \quad 5.12$$

Et dans le MATLAB/SIMULINK nous représentons les variables d'entrée comme :

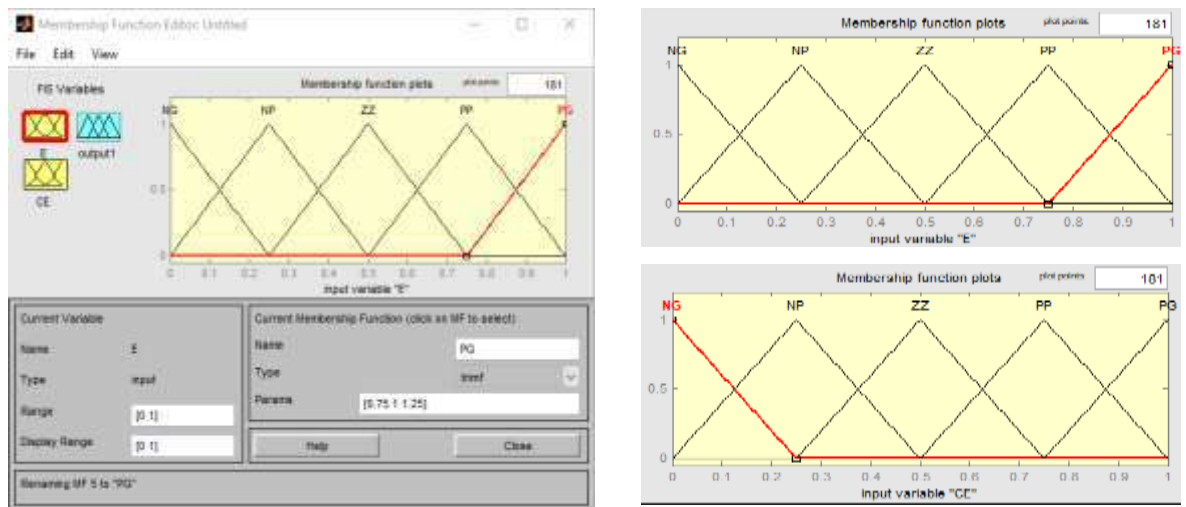


Figure 5-25 Les sous-ensembles pour les entrées E et CE.

Dans ce cas les variables seront variées respectivement : NG (Négative Grand), NP (Négative Petite), ZZ (Erreur nul ou bien zéro), PP (Positive Petite), PG (Positive Grand)

3.4.2. L'inférence

La stratégie de réglage repose sur les inférences établies, qui relient les variables d'entrée à la variable de sortie. Cette étape consiste à définir une relation logique ($\alpha\alpha$) entre les entrées, obtenues après le processus de fuzzification, et la sortie, produite par le processus de défuzzification. Cela permet de déterminer comment les valeurs des variables floues d'entrée influencent la génération de la variable floue de sortie, en s'appuyant sur un ensemble de règles prédéfinies. (M.Hatti, 2008).

Les règles d'inférence utilisées dans ces cas sont présentées dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 Tableau de réglage floue.

	CE	NG	NP	ZZ	PP	PG
E						
NG		ZZ	ZZ	PG	PG	PG
NP		ZZ	ZZ	PP	PP	PP
ZZ		PP	ZZ	ZZ	ZZ	NP
PP		NP	NP	NP	ZZ	ZZ
PG		NG	NG	NG	ZZ	ZZ

L'erreur $E(t)$ est utilisée pour déterminer la position du point de fonctionnement sur la courbe, selon les principes suivants :

À gauche du point de fonctionnement, l'erreur est toujours positive.

À droite du point de fonctionnement, l'erreur devient toujours négative.

La variation de l'erreur $CE(t)$, quant à elle, indique le sens de déplacement du point de fonctionnement sur la courbe :

Elle est positive lorsque le déplacement se fait dans la direction correcte vers le point de puissance maximale (MPP).

Elle est négative lorsque le déplacement se fait dans la direction opposée.

Dans le cadre des inférences, on utilise les opérateurs logiques ET et OU :

L'opérateur ET est appliqué pour relier les variables à l'intérieur d'une même règle.

L'opérateur OU est utilisé pour connecter différentes règles entre elles.

Il existe plusieurs méthodes pour implémenter ces opérateurs dans les inférences, parmi lesquelles :(Baghli, 1999).

- La méthode d'inférence max-min
- La méthode d'inférence max-prod
- La méthode d'inférence somme-prod

Dans notre cas, la méthode d'inférence max-min est utilisée.

3.4.2.1. Méthode d'inférence max-min :

Dans la méthode d'inférence max-min, l'opérateur ET est réalisé en prenant le minimum des valeurs des fonctions d'appartenance associées aux différentes variables d'entrée. L'opérateur OU, quant à lui, est effectué en prenant le maximum des valeurs des fonctions d'appartenance des différentes variables d'entrée. Enfin, l'opérateur ALORS (ou l'implication) est aussi réalisé par la formation du minimum (M.Hatti, 2008).

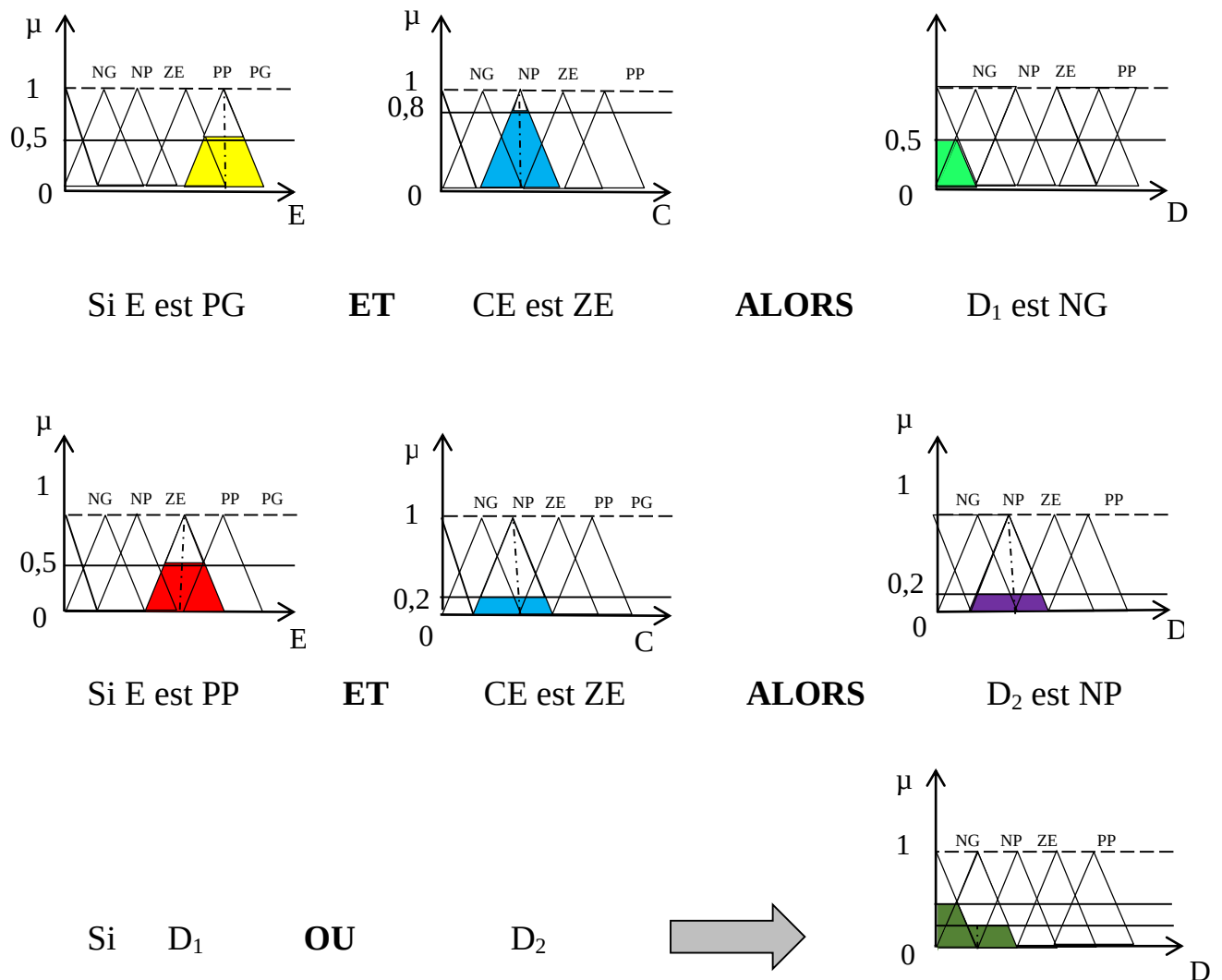


Figure 5-26 Méthode d'inférence MAX-MIN.

3.4.3. La défuzzification

La dernière partie de logique floue est la défuzzification, ou l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue. C'est l'objectif de la défuzzification (Cherifi et Miloud, 2011).

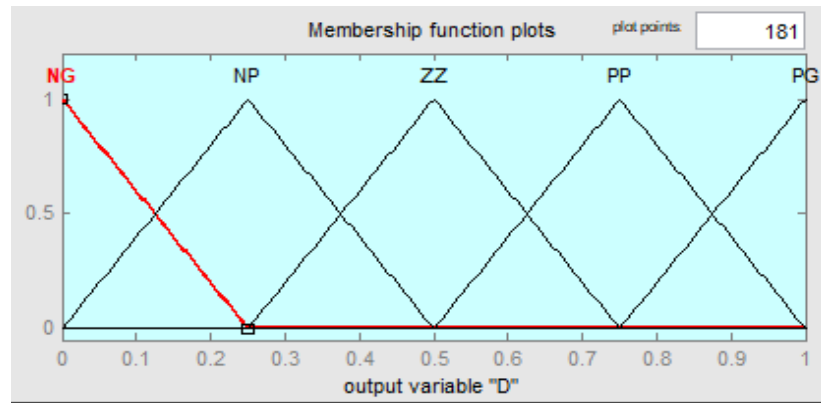


Figure 5-27 Les sous-ensembles pour la sortie $d(\alpha)$.

Les modèles de régulateur flous les plus utilisés sont :

- Régulateur flou de type MAMDANI
- Régulateur flou de type SUGENO
- Modèle flou de LARCEN
- Modèle flou de TSUKAMOT

Dans notre étude, nous avons utilisé un régulateur flou de type MAMDANI avec les fonctions d'appartenance triangulaire.

3.5. La commande MPPT à base de la Logique floue

Le modèle SIMULINK du système PV régulé par la commande MPPT à base de la Logique floue présenté dans la Figure 5-28

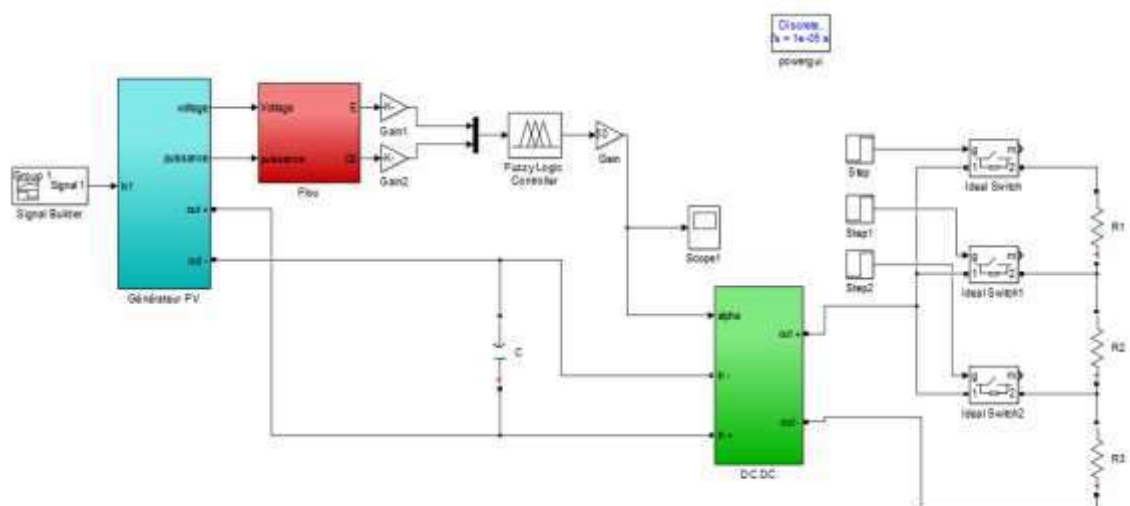


Figure 5-28 Schéma de la commande MPPT floue en MATLAB-SIMULINK.

4. Résultats des simulations et discussion

Pour obtenus des résultats très proches pour l'installation des panneaux solaire Les charges résistives qui nous choisissons pour la simulation doivent être cohérents avec les besoins quotidiens en électricité dans une maison autonome de la ville de Ouargla et ses environs. La variation des charges est une perturbation pour le GPV et qui déplacent le point de fonctionnement optimal MPP. L'éclairement constitue également une source de perturbation pour le GPV en raison de la variation de son intensité au cours de la journée, ainsi que de l'ombre partielle ou totale qui peut affecter la surface des panneaux solaires. Nous présentons les résultats de simulation pour le cas de perturbation de charges de résistance de 10,20 et 30 Ω qui sont associées au GPV avant et après la régulation pour des éclairagements de 1000,900 et 800w/m². Ensuite nous considérons la perturbation de l'éclairement pour une charge constante et pour une charge variable.

Les caractéristiques électriques de notre générateur photovoltaïque sont données dans le tableau 3-1

Tableau 5-3 caractéristiques électriques de Générateur Photovoltaïque.

Éclairement standard (G)	1000W/m ²
Température standard (T)	25°C
Tension optimale (V _{opt})	36 V
Courant optimal (I _{opt})	4,5 A
Tension à circuit ouvert (V _{co})	44 V
Courant de court-circuit (I _{cc})	5 A
Nombre des modules en séries	8
Nombre des modules en parallèle	2

Et aussi la Figure présenté le schéma de notre générateur photovoltaïque

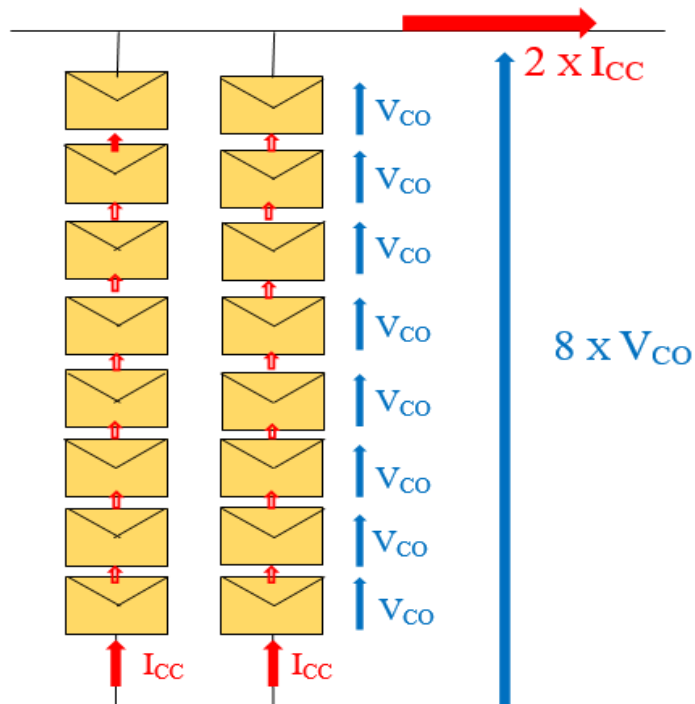


Figure 5-29 Schéma simple de notre générateur photovoltaïque.

4.1. Résultats de simulation du système sans régulation

La Figure 5-30 présente les caractéristiques P-V de notre générateur photovoltaïque associé à différentes charges.

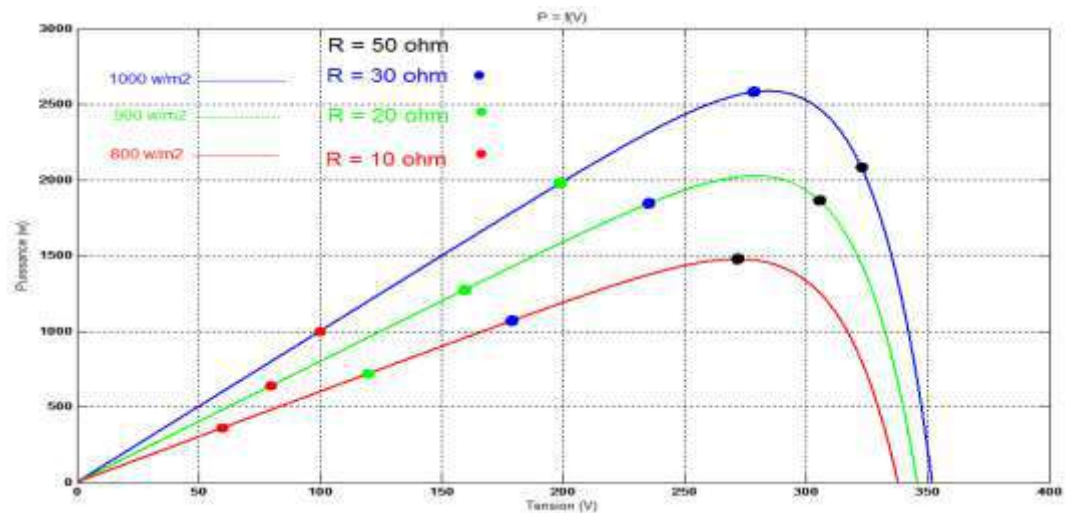


Figure 5-30 Caractéristiques (P, V) pour différents éclairagements et une température standard avec différentes charges.

Le générateur photovoltaïque est fortement influencé par la variation de l'éclairement, sous l'hypothèse d'une température constante (Figure 5-30). La puissance produite par ce générateur varie de manière proportionnelle en fonction de l'intensité de

l'éclairement. Les résultats révèlent que la puissance générée par le GPV n'est optimale pour les différents éclairements et charges considérés comme perturbation.

Les caractéristiques I.V de notre GPV et les droites des charges présentées dans la Figure 5-31.

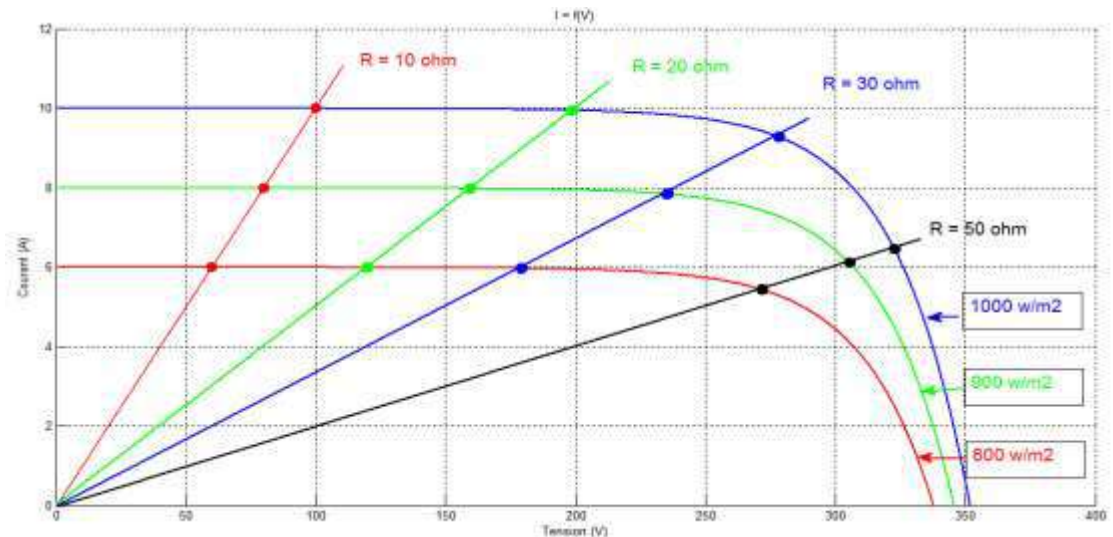


Figure 5-31 Caractéristiques (I, V) pour différents éclairements et une température standard avec différentes charges.

La Figure 5-31 présente les variations des droites des charges pour différentes valeurs des résistances. Pour une variation de la charge, le courant et la puissance produite ont fortement changé. Quand la résistance de charge augmente, le courant tend vers la valeur zéro et la tension tend vers la valeur maximale, et pour une diminution, le courant tend vers la valeur maximale et la tension tend vers zéro. Mais dans les deux cas (augmentation, diminution), L'énergie produite n'est pas maximale d'où la nécessité d'ajouter un système de régulation pour maximiser la puissance.

4.1.1. Variation d'éclairement

Un profil d'un éclairement variable est présenté dans la Figure 5-32 pour étudier l'effet de cette variation sur la puissance produite pour une charge constante.

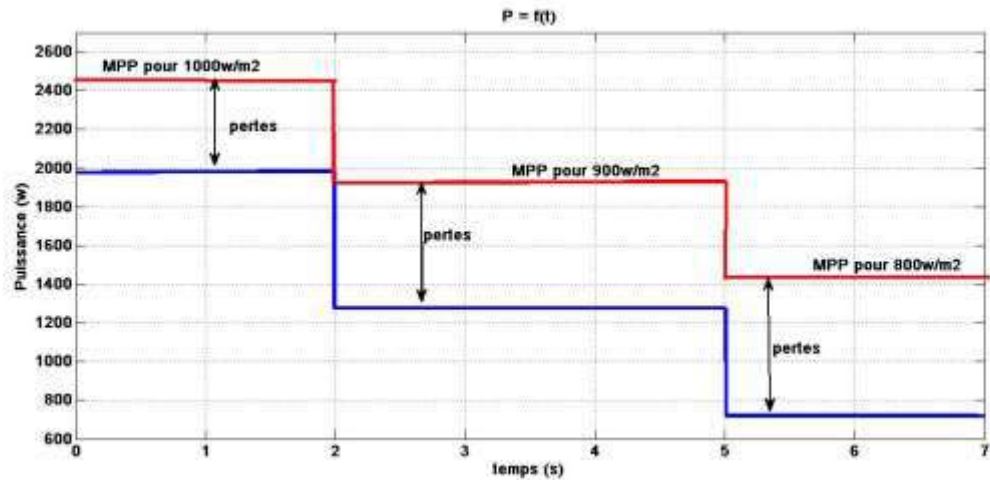


Figure 5-32 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement sans régulation pour une charge constant $R = 20\Omega$.

Dans un premier temps, nous commençons la simulation avec un éclairement de 1000w/m², à l'instant $t=2$ s nous changeons l'éclairement de 1000 à 900 W/m², et de 900 à 800 W/m² à l'instant $t=4$ s. À partir la Figure 5-37, nous remarquons que la puissance varie proportionnellement avec l'éclairement (diminution de l'éclairement accompagné par diminution de la puissance), mais les pertes de puissance dans les trois zones est considérable.

4.1.2. Variation de charge

Un profil d'un éclairement constant (800W/m²) est considéré dans la Figure suivante pour étudier l'effet de la variation de la charge (10Ω , 20Ω et 30Ω) sur la puissance produite.

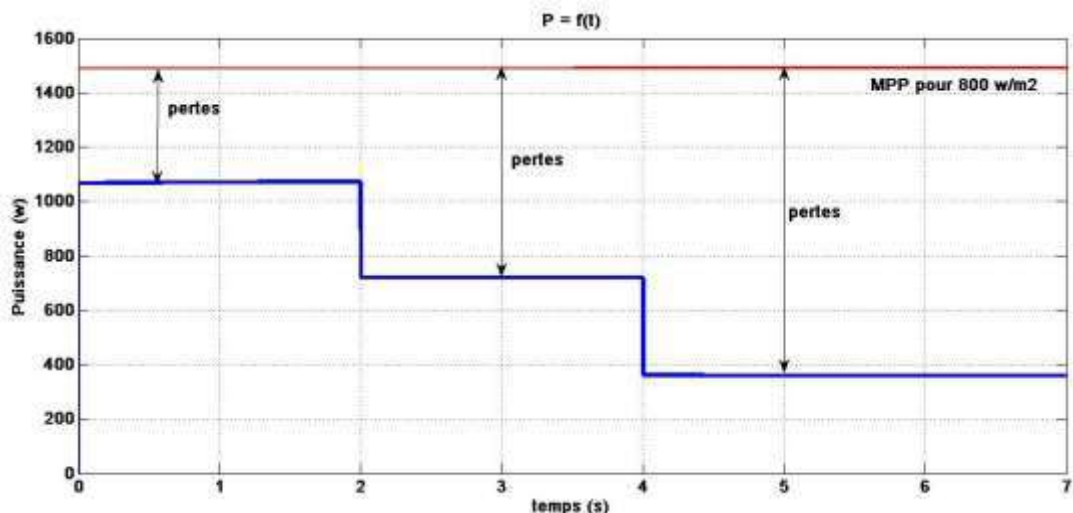


Figure 5-33 Allure de la puissance face à une variation de charge sans régulation pour un éclairement constante $G = 800\text{w/m}^2$.

Les résultats permettent de vérifier le comportement du système au cours d'une variation de charge, nous changeons la charge de $30\ \Omega$ à $20\ \Omega$ à l'instante $t=2\text{ s}$ et de $20\ \Omega$ à $10\ \Omega$ à l'instante $t=4\text{ s}$, avec un éclairement constant (800 w/m^2).

À partir la Figure 5-33 il est clair que puissance accompagnée directement par le changement de charge pour un éclairement constant de 800 w/m^2 , mais l'inconvénient est l'augmentation des pertes à cause la diminution de la charge résistive. Pour une charge de $30\ \Omega$ la puissance 1068 w , pour une charge de $20\ \Omega$ la puissance 717 w et pour une charge de $10\ \Omega$ la puissance est 360 w/m^2 , (Loin de la puissance maximale).

4.2. Résultats de simulation du système avec régulation

Les Figures ci-après montrent le point de puissance maximale que le régulateur permet de poursuivre en dépit de la variation de l'éclairement ou celle de la charge.

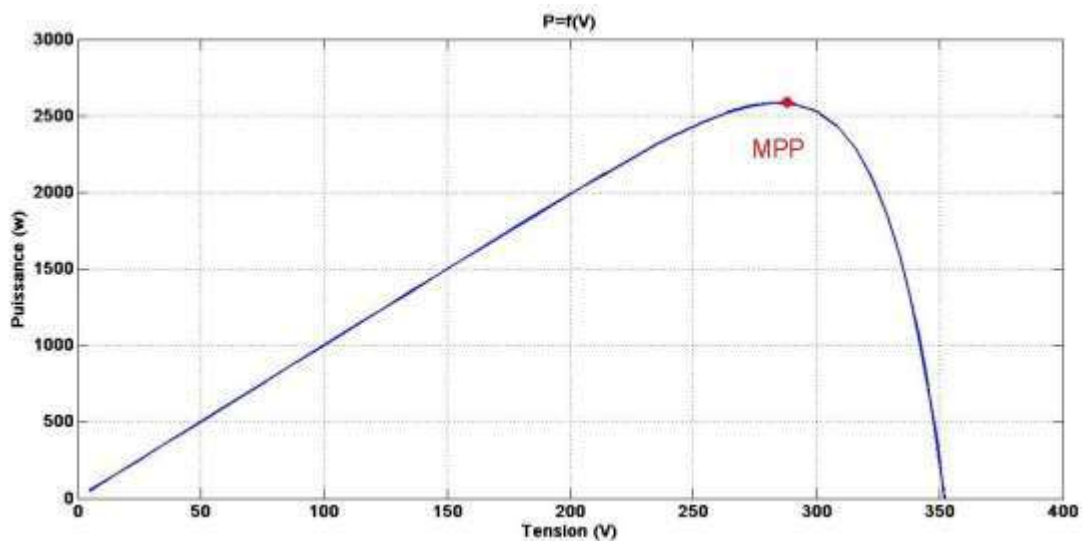


Figure 5-34 le point de puissance maximal MPP (maximum power point).

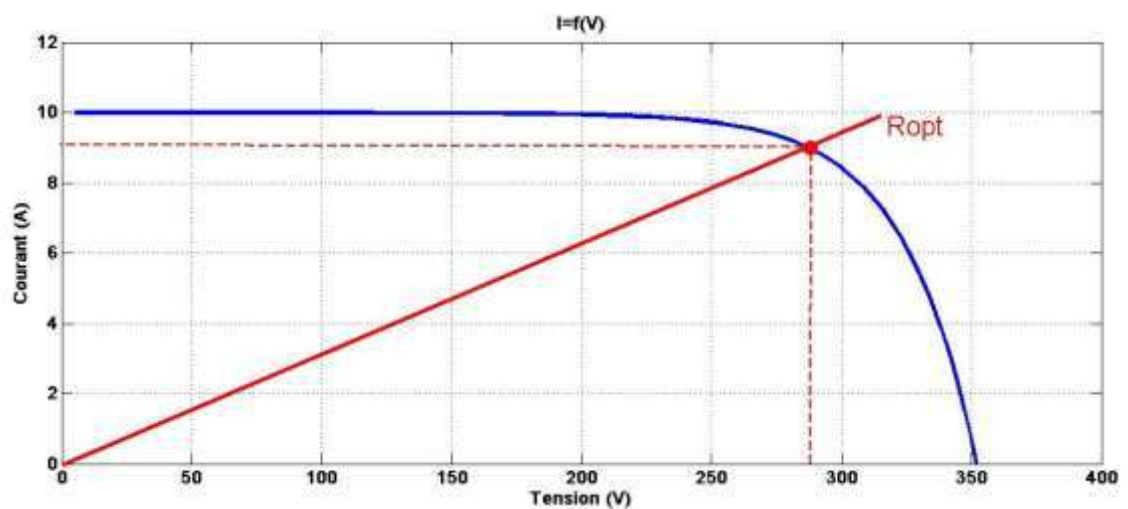


Figure 5-35 le droit de charge optimal.

L'objectif de la régulation est d'adapter la tension de charge via le contrôle de l'angle d'amorçage de l'hacheur afin que le point de fonctionnement se situe en permanence dans la zone de puissance maximale du générateur photovoltaïque. Par la suite nous présentons les résultats de simulation pour deux méthodes poursuite du point de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking), (P&O) et régulateur flou.

4.2.1. Régulation avec la commande MPPT (Perturbe & Observe)

Les résultats de la simulation du système Photovoltaïque utilisant l'algorithme P&O présentés sur les Figures 5-36, 5-37 et 5-38.

4.2.1.1. Variation d'éclairement

Pour ce résultat de simulation, une variation de l'éclairement (1000 W/m^2 , 900 W/m^2 et 800 W/m^2) a été étudiée, tout en maintenant une charge constante de 10Ω .

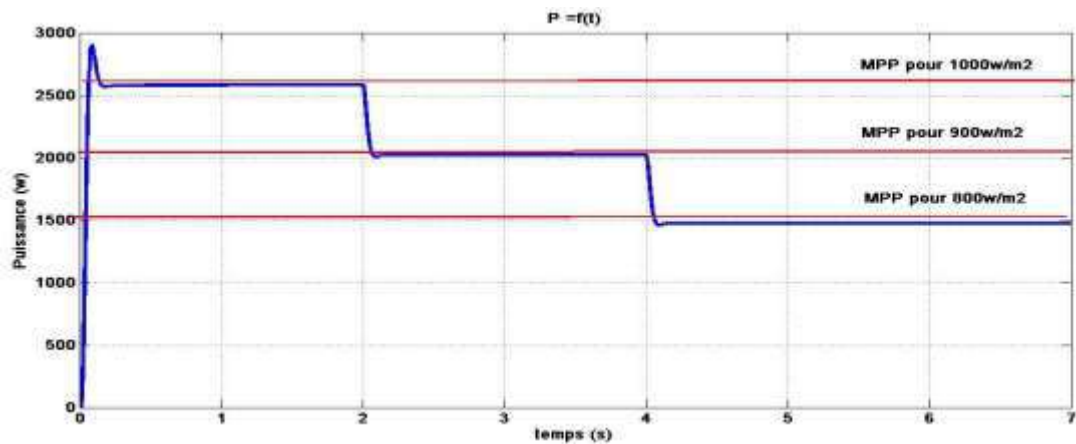


Figure 5-36 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge constante $R = 10\Omega$.

Dans la première étape, nous avons soumis le système à une variation d'éclairement de 1000 à 900 W/m^2 à l'instant $t=2\text{s}$, et de 900 à 800 W/m^2 à l'instant $t=4\text{s}$.

Par conséquent, comme illustré dans la Figure 5-36, nous constatons que la variation de la puissance en fonction du temps est proportionnelle à l'éclairement. Pour un éclairement de 1000 W/m^2 , la puissance produite atteint sa valeur maximale de 2600 W . Après la première perturbation à l'instant $t=2 \text{ s}$, l'éclairement diminue à 900 W/m^2 , et la puissance produite correspond à la puissance maximale associée à cet éclairement, soit 2000 W . Lors de la seconde perturbation à $t=4$, l'éclairement chute à 800 W/m^2 , et la puissance produite se stabilise à sa valeur maximale de 1500 W pour cet éclairement.

4.2.1.2. Variation de charge

Dans la deuxième étape, afin d'évaluer le comportement du système face à une variation de la charge, nous modifions cette dernière de $30\ \Omega$ à $20\ \Omega$ à l'instant $t=2s$, puis de $20\ \Omega$ à $10\ \Omega$ à l'instant $t=4s$, tout en maintenant un éclairement constant de $1000\ \text{W/m}^2$.

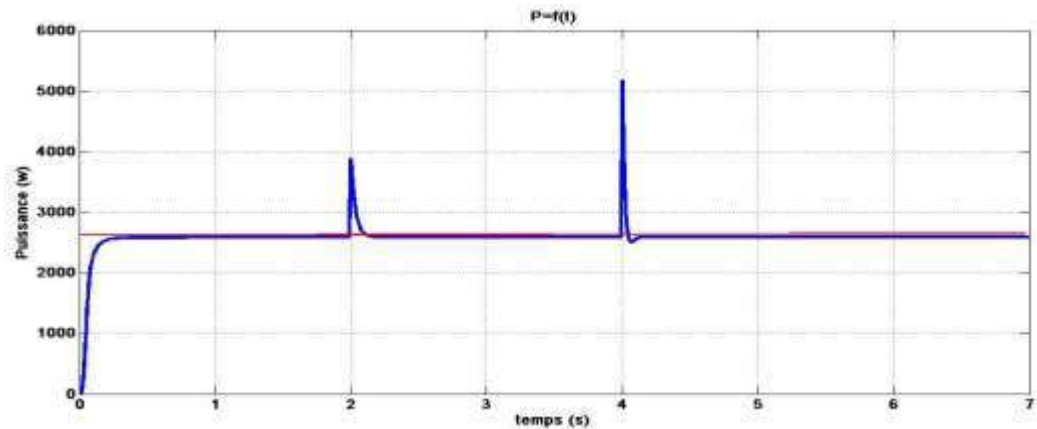


Figure 5-37 Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT P&O pour un éclairement constante $G = 1000\ \text{W/m}^2$.

Les résultats de la simulation dans la Figure 5-37 indiquent que la variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale. Cependant, l'avantage de ce système est le retour rapide à la puissance maximale, grâce au mécanisme de régulation basé sur l'algorithme MPPT (P&O).

4.2.1.3. Perturbation d'éclairement pour une charge variable

Dans cette étape, nous cherchons à vérifier le comportement du système face à deux perturbations simultanées : la variation de l'éclairement et le changement de la charge. Nous avons effectué les modifications suivantes :

À $t=2\ \text{s}$, la charge est modifiée de $30\ \Omega$ à $20\ \Omega$.

À $t=6\ \text{s}$, la charge est à nouveau modifiée de $20\ \Omega$ à $10\ \Omega$.

Entre $t=4\ \text{s}$ et $t=6\ \text{s}$, l'éclairement change de $1000\ \text{W/m}^2$ à $800\ \text{W/m}^2$, (Figure 5-38).

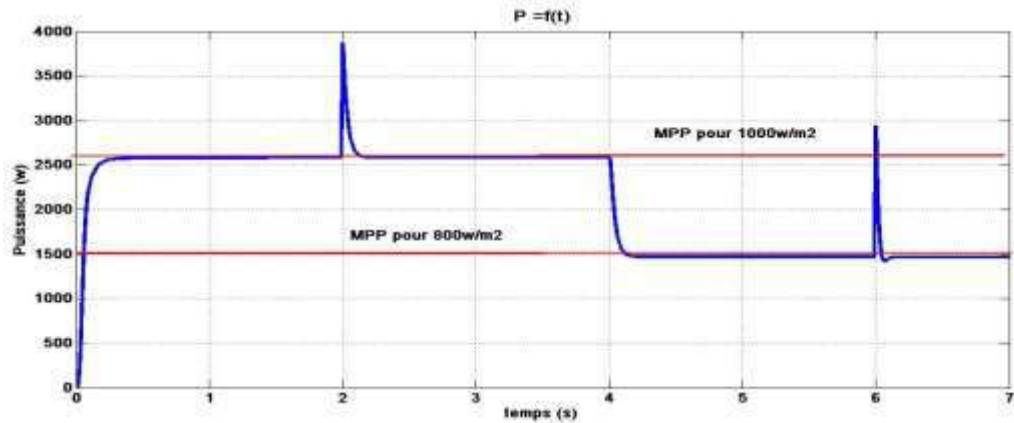


Figure 5-38 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge variable.

Le résultat obtenu montre que, pendant l'éclairement de 1000 W/m^2 , la puissance reste maintenue à sa valeur maximale de 2600 W , malgré la variation de la charge de 30Ω à 20Ω . De même, lorsque l'éclairement est réduit à 800 W/m^2 , la puissance reste également à sa valeur maximale de 1500 W , malgré la variation de la charge de 20Ω à 10Ω .

4.2.2. Régulation avec la commande MPPT flou

Les résultats de la simulation du système PV utilisant la logique floue sont présentés aux Figures 5-39, 5-40 et 5-41.

4.2.2.1. Variation d'éclairement

Pour ce résultat de simulation, nous avons considéré une variation de l'éclairement pour une charge constante de 10Ω . Premièrement, nous avons soumis le système à une variation d'éclairement de 1000 W/m^2 à 900 W/m^2 à l'instant $t=2 \text{ s}$. et de 900 W/m^2 à 800 W/m^2 à l'instant $t=4 \text{ s}$.

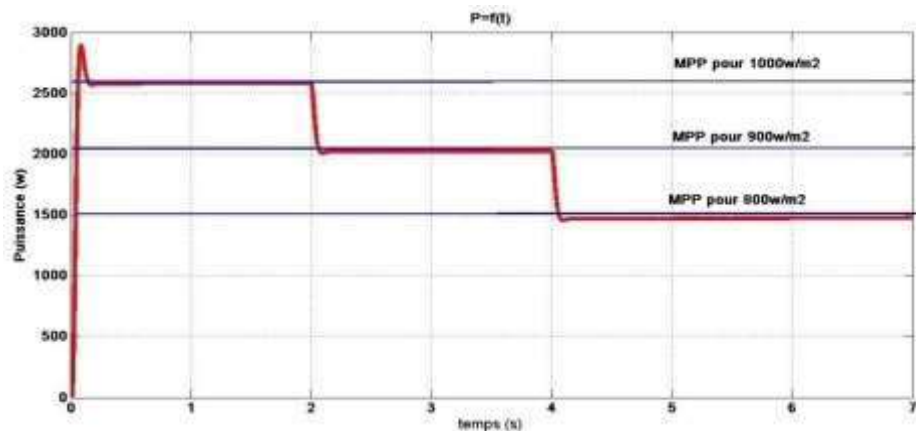


Figure 5-39 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT flou pour une charge constante $R = 10\Omega$.

Nous constatons dans l'allure ci-dessus que la variation de la puissance est proportionnelle à l'éclairement. Pour un éclairement de 1000 W/m^2 , la puissance produite atteint sa valeur maximale de 2600 W . Après la première perturbation à l'instant $t=2 \text{ s}$, lorsque l'éclairement passe à 900 W/m^2 , la puissance produite reste à sa valeur maximale pour cet éclairement, soit 2000 W . Lors de la seconde perturbation à $t=4 \text{ s}$, l'éclairement diminue à 800 W/m^2 , et la puissance produite se maintient à sa valeur maximale de 1500 W pour cet éclairement.

4.2.2.2. Variation de charge

Deuxièmement, nous avons vérifié le comportement du système face à une variation de charge. Pour ce faire, nous avons effectué les changements suivants :

À $t=2\text{s}$, la charge a été modifiée de 30Ω à 20Ω .

À $t=4\text{s}$, la charge a été réduite de 20Ω à 10Ω .

L'éclairement a été maintenu constant à 1000 W/m^2 tout au long de cette simulation.

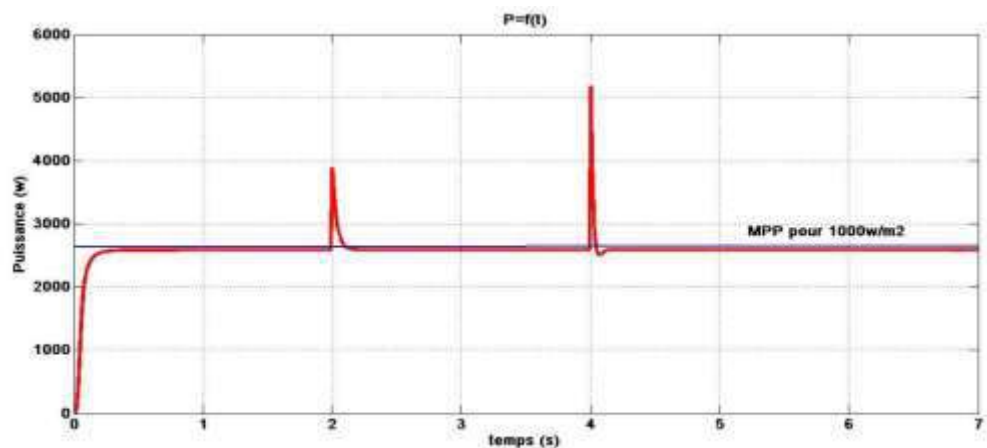


Figure 5-40 Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT flou pour un éclairement constante $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

La Figure 5-40 montre que la variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale, comme cela a été observé dans la méthode précédente. Cependant, l'avantage de l'algorithme MPPT flou réside dans sa rapidité de retour vers le point de puissance maximale (MPP).

4.2.2.3. Perturbation d'éclairement pour une charge variable

Dans cette phase, nous cherchons à analyser et à évaluer la réponse du système face à deux types de perturbations : les variations d'éclairement et les fluctuations de charge. À cet effet, la charge a été modifiée de 30Ω à 20Ω à $t = 2 \text{ s}$, puis de 20Ω à 10Ω à $t = 6 \text{ s}$. Par

ailleurs, entre ces deux instants, à $t = 4$ s, l'éclairement a été ajusté, passant de 1000 W/m^2 à 800 W/m^2 , (Figure 5-41).

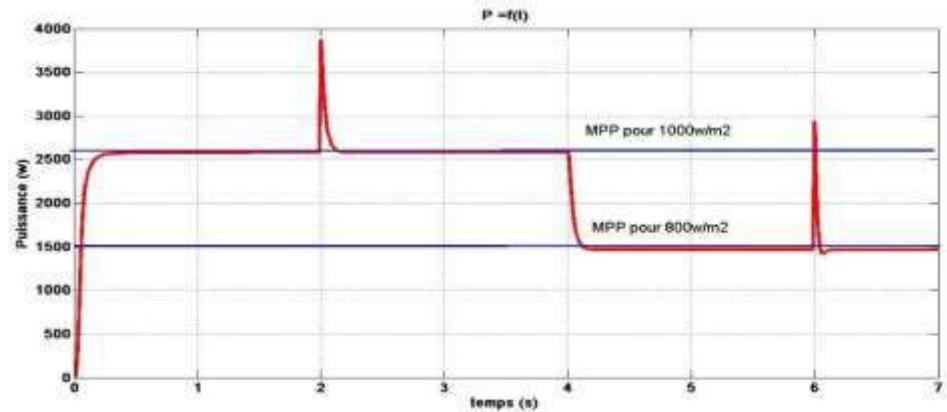


Figure 5-41 Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT fluou pour une charge variable.

Les résultats obtenus indiquent que, sous un éclairement de 1000 W/m^2 ou 800 W/m^2 , la puissance reste stabilisée à sa valeur maximale (2600 W ou 1500 W, respectivement), et ce, malgré les variations de charge de 30Ω à 20Ω , puis de 20Ω à 10Ω .

4.2.3. Comparaison des résultats entre les deux commandes de régulation

Pour réaliser une comparaison entre les deux commandes de régulation (MPPT P&O et MPPT fluou), nous utilisons un seul graphe sans variation d'éclairement et sans changement de charge. La Figure 5-42 présente la comparaison entre la commande MPPT P&O et la commande MPPT fluou.

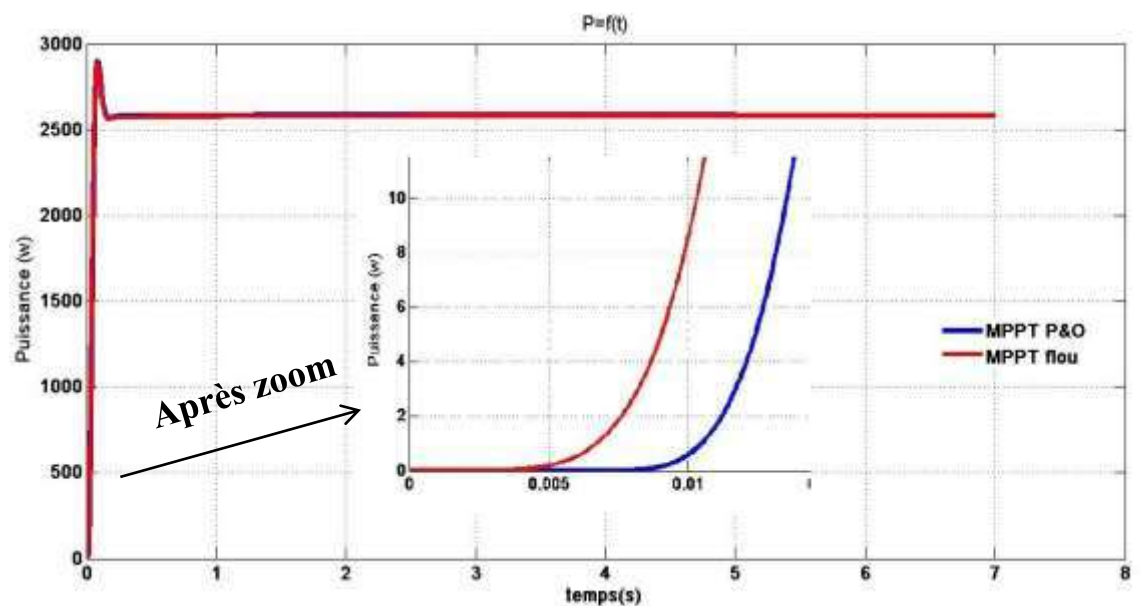


Figure 5-42 Allure de comparaison de puissance entre les deux commandes MPPT (P&O et fluou).

À partir de la Figure 5-42 Les deux méthodes assurent une poursuite efficace de la puissance maximale. Cependant, en examinant de plus près, on constate une différence notable au niveau du temps de réponse : la commande MPPT floue réagit plus rapidement que la commande MPPT P&O (0,005s différence). Le gain de la commande MPPT flou avec la commande MPPT P&O est la rapidité de réponse

4.2.4. Le gain en puissance du système régulé

Pour faire valoir l'apport de la nécessité de la régulation nous comparons la puissance des charges avec et sans régulation qui sont présentés dans le tableau 5-4

Tableau 5-4 comparaison entre le système sans et avec régulation.

		Puissance sans régulation (w)	Puissance avec régulation (w)	Le gain de puissance (w)	Taux du Gain (%)
G=800w/m ²	R= 10Ω	360	1471	1111	308,6
	R= 20Ω	717	1471	754	105,16
	R= 30Ω	1068	1471	403	37,73
R= 10Ω	G= 800w/m ²	360	1471	1111	308,6
	G= 900w/m ²	608	2023	1415	232,73
	G=1000w/m ²	958	2580	1622	139,61

Nous remarquons que l'énergie après l'utilisation du système de régulation est grande, où arrivé à 2,3 ou 4 fois l'énergie sans régulation.

5. Conclusion

Ce chapitre aborde la commande MPPT P&O qui permet de poursuivre le MPP de GPV sous différentes conditions de fonctionnement, aussi il explique le principe de la logique floue et l'algorithme MPPT flou implémenté dans le modèle SIMULINK de notre système. Dans les systèmes photovoltaïques sans régulation, Une part importante de la puissance produite par le générateur photovoltaïque demeure inexploitable. Cela s'explique par les perturbations survenant au niveau de la charge ou de la source (éclairage), qui affectent le point de puissance maximale du générateur. Nous avons comparé deux fonctionnements d'un système photovoltaïques. Le premier simule un fonctionnement au fil du soleil sans l'interface électronique ou les résultats révèlent un fonctionnement non optimal ; une grande partie de la puissance du générateur photovoltaïque n'est pas transmise à la charge. Dans le second cas, nous avons intégré un système de régulation par l'algorithme stochastique de la logique floue qui offre une solution à la perte de puissance dans le système par les biais de l'algorithme de régulation qui contrôle l'angle d'amorçage de l'hacheur, il assure le fonctionnement de puissance optimale au niveau de la charge malgré les perturbations externes du système. Un gain en puissance considérable et remarquée après la régulation du système. Les résultats montrent un gain en puissance très considérable pour les éclaircissements élevés.

Conclusion générale

Le but de cette thèse est de concevoir un dispositif passif pour réduire la température d'une résidence isolée. Le système doit assurer, durant toute l'année, un niveau de température interne confortable aux occupants. L'approche se base d'une part, sur la limitation du flux de chaleur externe par des protections et des isolations plus performantes et d'autre part, sur l'intégration des systèmes de refroidissement passif, dont l'exploitation de l'énergie géothermique. Les résidences isolées sont alimentées en électricité par des panneaux photovoltaïques, assistés de moyens de stockage d'énergie. Tout cet ensemble de dispositifs nécessite le développement d'un outil d'optimisation pour maîtriser le coût et la performance pour une exploitation maximale du local.

Une partie de notre étude porte sur l'analyse de l'évolution de la température dans un local semi-enterré, avec une hauteur de 0,8 m au-dessus du niveau du sol et une profondeur de 3 m sous terre. Les résultats obtenus révèlent que la température intérieure du local est très satisfaisante, offrant un confort thermique sans recours à une consommation électrique. Un travail expérimental est réalisé pour la récolte de mesures réelles sur une maison semi-souterraine dans la région de Metlili (Ghardaïa), qui servira à valider les résultats de la simulation.

Une autre partie de la thèse se penche sur l'étude de l'alimentation électrique de la résidence par des panneaux photovoltaïques (PV). Elle a fait l'objet d'une simulation numérique d'un système (PV) autonome, régulé par la méthode de suivre le point de fonctionnement à la puissance maximal (MPPT), avec la commande de perturbe-observe (P&O) et la méthode de MPPT floue. Le gain en puissance obtenu a atteint 139%, aux conditions standards d'éclairement et de température.

Dans cette étude, nous avons passé en revue les résidences traditionnelles de Ghardaïa, Ouargla et El-oued. Pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment, il est possible d'intégrer diverses stratégies de conception, qu'elles soient actives ou passives. Les stratégies actives incluent principalement des systèmes de chauffage et de refroidissement, tandis que les approches passives reposent sur des éléments tels que l'orientation optimale du bâtiment. Pour cela, nous avons étudié la conception d'une maison constituée d'un local semi-souterrain et d'un étage. Elle consiste à minimiser la consommation énergétique pendant la période d'été et l'exploitation du rôle des constructions traditionnelles comme « la Sguifa » (SABAT), « la Gouba », etc. De même, le comportement thermique d'un local semi-souterrain dans le climat

chaud est examiné par simulation de flux d'air en trois dimensions. Les résultats de la simulation du flux d'air, dans le cas de base du local semi-souterrain, sont validés par les mesures expérimentales de la température intérieure. Les résultats des cas de base montrent une performance insuffisante du refroidissement passif dans une période chaude de l'été. Deux conceptions proposées sont examinées dans la situation critique de la température ambiante.

La première conception, examinée sous ventilation naturelle, montre une amélioration sensible du confort thermique. Mais, la deuxième conception, renforcée par un petit ventilateur, montre un meilleur refroidissement passif, où la température est très acceptable dans tout l'espace de vie du local. Pendant la période très chaude (48°C), les deux configurations montrent que la conception du local semi-souterrain présente une solution très intéressante pour la conception du bâtiment. La température au milieu de local ne dépasse pas 25°C à une hauteur de 2 m, tandis que la température pour une hauteur comprise entre 2 m et 3 m, oscille entre 25°C et $27,5^{\circ}\text{C}$. En cas de ventilation forcée, le niveau de ventilation reste non gênant et assure une bonne aération de la chambre. Le local atteint un refroidissement très appréciable, qui est considéré comme un confort thermique acceptable, avec de petites dépenses de consommation d'énergie.

Dans le premier étage, l'objectif de l'étude est d'évaluer l'évolution des besoins énergétiques et donc de la consommation annuelle, en fonction des mesures d'efficacité énergétique choisies, pour une maison conçue sur la base de constructions conventionnelles et de données géographiques et météorologiques locales, ainsi que sur la simulation des données par le logiciel TRNSYS, pour déterminer les besoins énergétiques optimaux couvrant la consommation annuelle du bâti. Pour cerner ces besoins, nous avons proposé l'intégration de l'énergie solaire sous forme thermique, tels que le chauffage solaire et l'introduction de la géothermie indirecte par le biais d'échangeurs air-sol, qui feront l'objet d'un travail séparé.

Enfin, nous avons abordé l'utilisation du photovoltaïque avec un rappel du principe de l'effet de la conversion PV, l'effet des perturbations externes au niveau de la source (température et éclairage) ainsi que l'effet de l'association des modules PV, pour obtenir un générateur photovoltaïque et une petite explication sur le convertisseur DC/DC Buck. Ensuite, on a présenté la commande MPPT P&O, qui permet de poursuivre le MPP de GPV, sous différentes conditions de fonctionnement et le principe de la logique floue et de l'algorithme MPPT floue, implémentés dans le modèle SIMULINK de notre système. Dans les systèmes photovoltaïques sans régulation, une grande partie de la puissance générée par le générateur photovoltaïque reste inexploitée, cela est dû aux perturbations au niveau de la charge ou au

niveau de la source (l'éclairement), qui perturbent le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque. Dans cette étude, nous avons comparé deux fonctionnements d'un système photovoltaïques : Le premier simule un fonctionnement au fil du soleil, sans l'interface électronique, où les résultats révèlent un fonctionnement non optimal avec une grande partie de la puissance du générateur photovoltaïque qui n'est pas transmise à la charge. Dans le second cas, nous avons intégré un système de régulation par l'algorithme stochastique de la logique floue qui offre une solution à la perte de puissance, dans le système, par les biais de l'algorithme de régulation qui contrôle l'angle d'amorçage du convertisseur DC/DC, il assure le fonctionnement en puissance optimale, au niveau de la charge, malgré les perturbations externes du système. Un gain en puissance considérable est remarqué après la régulation du système. Les résultats montrent un gain de puissance très considérable pour les éclaircissements élevés.

- Abada, S. (2011). Etude Et Optimisation d'Un Générateur Photovoltaïque Pour La Recharge D'Une Batterie Avec Un Convertisseur Sepic.
- Adi Ainurzaman, J., Noor Zalina, M., Nila, I., Ati Rosemary, M. A., & Hazreena, H. (2013). Energy audit and prospective energy conservation: Studies at residential college buildings in a tropical region. *Energy Audit and Prospective Energy Conservation*, 31(3), 158–173. <https://doi.org/10.1108/02632771311299430>
- Akchiche, Z. (2011). Étude De Comportement D'une Cheminée Solaire En Vue De L'isolation Thermique.
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., & Ervina Efzan, M. N. (2016). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 692–713. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>
- ANSYS, <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>, (Consulté le 2 octobre 2018).
- ANSYS. (2010). Methodology Introduction to ANSYS FLUENT (Issue December).
- Anthony, A. S., & Verma, T. N. (2021). Numerical Analysis of Natural Convection in A Heated Room and its Implication on Thermal Comfort. *Journal of Thermal Engineering*, 7(1), 37–53. <https://doi.org/10.18186/thermal.840007>
- Arantes, L. (2014). L' ' intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située.
- Ayache, Z., Bendaoud, A., Slimani, H., Benazza, B., Miloudi, H., & Bentaallah, A. (2010). Commande MPPT et Contrôle d' un Système Photovoltaïque par la Logique Floue. International conference on electrical networks (ICEN 2010), Sidi Bel-Abbes
- Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2003). Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 69(3–4), 245–272. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00285-5)
- Baghli, L. (1999). Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.
- Bahria, S., Amirat, M., Hamidat, A., El Ganaoui, M., & Slimani, M. (2016). Parametric study of solar heating and cooling systems in different climates of Algeria – A comparison between conventional and high-energy-performance buildings. *Energy*, 113, 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.022>
- Beigli, F., & Lenci, R. (2016). Underground and Semi Underground Passive Cooling Strategies in Hot Climate of Iran. *International Scientific Journal Journal of Environmental Science*, 5(3).
- Bejan, A. (2013). Convection Heat.
- Bejan, A., & Khairy, R. K. (1985). Heat and mass transfer by natural convection porous medium. *Inr.J. Heat Mass Transfer*, 28(5), 909–918.
- Belhadj, N. (2005). L'habitat traditionnel a oued souf.
- Ben Jmaa derbal, H., & Kanoun, O. (2010). Investigation of the ground thermal potential in tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), 1091–1100. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.022>

- Benamara, V. (2012). Étude Et Simulation D'un Panneau Solaire Raccordé Au Réseau Avec Périphérique De Stockage.
- Benarbia, I. (2012). Évaluation de la valeur esthétique des monuments historiques, cas de la grande mosquée de Nédroma. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18790.37443>
- benhamida, R. (2015). L'énergie entre les opportunités de développement et les risques de dégradation de la qualité de l'environnement : cas du gouvernorat de Sfax (Tunisie).
- Benmenine, D., & Ghodbane, M. (2020). A small parabolic trough collector as a solar water heater: an experimental study in Ouargla region, Algeria. *International Journal of Energetica*, 5(2), 1–6. <https://doi.org/10.47238/ijeca.v5i2.141>
- Bouhired, F. (2010). Recherche et Développement Développement des Chauffe Eau Solaires en Algérie. Recherche et Développement.
- Boumaaraf, B., Boumaaraf, H., & Slimani, M. E. (2019). Performance evaluation of a locally modified PV module to a PV / T solar collector under climatic conditions of semi-arid region. *Mathematics and Computers in Simulation*. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.09.013>
- Brahimi, A. (2018). Etude de performances d ' un capteur solaire plan à eau Aghilas Brahimi To cite this version : HAL Id : hal-01825548 soutenance et mis à disposition de l ' ensemble de la Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr. 190.
- Brouns, J. (2015). Développement d'outils numériques pour l'audit énergétique des bâtiments. Build-green, <https://www.build-green.fr/tag/maison-semi-enterree> (Consulté le 14 December 2020).
- Chen, Z., Zhang, P., & Li, J. (2007). Development and utilization of underground space for the protection of relics in the Yang Emperor Mausoleum of the Han Dynasty. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 1(2), 229–233. <https://doi.org/10.1007/s11709-007-0028-9>
- Chennouf, N., Negrou, B., Dokkar, B., & Settou, N. (2013). Valuation and estimation of geothermal electricity production using carbon dioxide as working fluid in the south of Algeria. *Energy Procedia*, 36, 967–976. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.110>
- Cherifi, D., & Miloud, Y. (2011). Une Structure Adaptative Basée Sur la Logique Floue Pour la Commande de la Vitesse d'un Moteur Asynchrone. The International Conference on Electronics & Oil ICEO11 March 1-2 2011, Ouargla.
- Clifford, K. H., & Stephen, W. W. (2006). Gas Transport in Porous Media. In *Gas Transport in Porous Media* (Issue January 2006). <https://doi.org/10.1007/1-4020-3962-x>
- Delmastro, C., Lavagno, E., & Schranz, L. (2016). Energy and underground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.021>
- Derradji, M., & Aiche, M. (2014). Modeling the soil surface temperature for natural cooling of buildings in hot climates. *Procedia Computer Science*, 32, 615–621. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.468>
- Djelloul, A., & Moumami, B. D. N. (2013). Residentiels Au Sud Algerien. *Courrier Du Savoir*, 17, 113–119.
- Dokkar, B., Negrou, B., & Chenouff, N. (2013). Passive cooling of telecom shelter using solar chimney with Earth-air heat exchanger. 134–138.

- Dokkar, B., Settou, N., & Chennouf, N. (2016.). Application des énergies renouvelables.
- D.T.R C3.4. (1998). Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation, Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques'. CNERIB 1998
- Dreamstime, <https://fr.dreamstime.com/photos-images/kaymakli-undergrund-city.html>, (Consulté le 22 Février 2021).
- Ecosolaire, <https://www.ecosolaire.com/2017/10/10/carte-densoleillement-de-la-France>, (Consulté le 26 Février 2021).
- El Hassar, S. M. K., Amirat, M., Silhadi, K., Souici, M., & Sakhraoui, S. (2002). Réglementation thermique algérienne des bâtiments. *Revue Française de Génie Civil*, 6(4), 661–681. <https://doi.org/10.1080/12795119.2002.9692393>
- ENERGYGOV, <https://www.energy.gov/energysaver/solar-water-heaters>, (Consulté le 12 Avril 2021).
- Franceinfo, https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/tunisie/sud-tunisien-les-derniers-habitants-des-maisons-troglodytes_3721229.html, (Consulté le 11 Novembre 2020).
- Gettyimages, <https://www.gettyimages.fr/photos/oued-souf>, (Consulté le 08 Novembre 2020).
- Ghedamsi, R., Settou, N., Saifi, N., & Dokkar, B. (2014). Contribution on buildings design with low consumption of energy incorporated PCMs. *Energy Procedia*, 50, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.039>
- Ghedamsi, R., Settou, N., Gouareh, A., Khamouli, A., Saifi, N., Reciou, B., & Dokkar, B. (2016). Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach. *Energy and Buildings*, 121, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.030>
- Ham, Y., & Golparvar-fard, M. (2013). An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery. *Advanced Engineering Informatics*, 27(3), 395–409. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.03.005>
- Hamdani, M. (2016). Choix de l'Orientation et des Matériaux de Construction en Vue d'Améliorer les Performances Thermiques des Bâtiments. In universite abou-bekr belkaid - tlemcen.
- Hassan, H., & El Kotory, A. M. (2019). A Discussion Of The Application's Possibility Of The Earth-Sheltered Building Type In Egypt. *The Academic Research Community Publication*, 3(1), 72. <https://doi.org/10.21625/archive.v3i1.432>
- Imessad, K., Kharchi, R., Bouchaib, S., Chenak, A., Hakem, S., Hamidat, A., Larbi-youcef, 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.
- Inhabitat, <https://inhabitat.com/700-year-old-underground-cave-homes-for-rent-in-iran/>, (Consulté le 11 Novembre 2020)
- Jaafar, A. (2013). Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance (Issue April).
- Jadhao, R. R., Barde, P., Rajput, V. S., & Makandar, G. (2017). Differentiating the Performance of Solar Water Heater under Natural and Forced Circulation. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(11).

- Jiao, Y., Li, Y., Wen, Y., Wah Wong, Y., Chuan Toh, K., Cheng Chua, C., & Ang, W. (2017). Thermal Analysis for Underground Data Centres in the Tropics. *Energy Procedia*, 143, 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.675>
- Kajtar, L., Nyers, J., & Szabo, J. (2015). Dynamic thermal dimensioning of underground spaces. *Energy*, 87, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.112>
- Kapri, N. (2020). Performance Analysis and Comparative Study of Different Types of DC-DC Converters. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 1(2), 5–10. <https://doi.org/10.47392/irjash.2019.12>
- Kety, K., Amou, K. A., Sagna, K., Tepe, K., Lare, Y., & Napo, K. (2016). Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque: Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo). *Revue Des Energies Renouvelables*, 19, 633–645.
- Khenfer, N. (2021). Contribution au développement et expérimentation d'un collecteur hybride photovoltaïque- thermique dans la zone de Ouargla Remerciements.
- Khenfer, N., Dokkar, B., & Messaoudi, M. T. (2020). Overall efficiency improvement of photovoltaic-thermal air collector: numerical and experimental investigation in the desert climate of Ouargla region. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(4), 497–516. <https://doi.org/10.1007/s40095-020-00353-1>
- Kumar Verma, M., Bansal, V., & Bihari Rana, K. (2020). Development of Passive Energy Source As Earth Air Pipe Heat Exchangers (Eaphe) System -a Review. *Journal of Thermal Engineering*, 6(5), 651–676. <https://doi.org/10.18186/thermal.790173>
- Bureau national de météorologie – Algeria, (2017).
- LePanneauSolaire, <https://www.lepanneausolaire.net/quels-sont-differents-types-chauffe-eau-solaires.php>, (Consulté le 03 Mars 2018).
- Lebsir, A. (2016). Les Cultures Constructives Traditionnelles Cas des Aurès , L ' Oued Mya et Le Souf. In *Mémoire de Magister en : Architecture Université Mohamed Khider, Biskra*.
- Lembo, F., Marino, F. P. R., & Calcagno, C. (2011). Semi-underground house models as new concepts for urban sustainable environment. *Procedia Engineering*, 21, 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2052>
- Li, S., Zhang, Y., Zhang, K., Li, X., Li, Y., & Zhang, X. (2014). Study on performance of storage tanks in solar water heater system in charge and discharge progress. *Energy Procedia*, 48, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.045>
- Li, Y., Geng, S., Zhang, X., & Zhang, H. (2017). Study of thermal comfort in underground construction based on field measurements and questionnaires in China. *Building and Environment*, 116, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003>
- M.Hatti. (2008). Contrôleur flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un champ Photovoltaïque. *JCGE'08 LYON 16 et 17 Décembre 2008*.
- Madheswaran, M., & Muruganandam, M. (2012). Simulation and Implementation of Pid-Ann Controller for Chopper Fed Embedded Pmdc Motor. *ICTACT Journal on Soft Computing*, 2(3), 319–324. <https://doi.org/10.21917/ijsc.2012.0049>
- Mazouz, S. (2006). Elément de la conception architecturale. In *Office des publications universitaires, Alger, Algérie*.

- Messaoudi, M.T., & Dokkar, B., Charrouf, O. (2018). Integration D'une Commande De Perturbe Et Observe Dans Un Systeme Photovoltaïque Autonome. Première Conférence Nationale Sur La Protection de l'Environnement et Les Energies Renouvelables. CNPER1-18 Date : 10 Mai 2018, Batna, ALGERIA.
- Messaoudi, M.T., Dokkar, B., Charrouf, O. (2021). Simulation d ' un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue. 1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA.
- Messaoudi, M. T., Dokkar, B., Khenfer, N., & Drid, M. M. (2021). 3d Investigation Of Semi - Underground Room Comfort In A Desert Climate. Journal of Thermal Engineering, Vol. 7, No. 7, pp. 1577–1590, November, 2021, <https://doi.org/10.18186/thermal.1025643>
- Meteoblue, <https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/weatherarchive>, (Consulté Janvier 2018).
- Meteonorm. (2020). Meteonorm, Handbook Part I: Software. Handbook Part II: Theory, September.
- Ministère de l'énergie. (2020). Bilan Energétique National 2019. 44
- Ministere de l'energie et des mines. (2020.). L'ensoleillement moyen annuel dans l'algerie, 2002-2011
- Mirrazavi, F. (2011). Cones of Kandovan. Iran Review. http://www.iranreview.org/content/Documents/Cones_of_Kandovan.htm
- Mnati, M. J., Gino, V., Araujo, M., Abed, J., & Bossche, A. Van Den. (2019). Review Different Types of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems. Ieee, June 2019, 0–7.
- Mukhtar, A., Ng, K. C., & Yusoff, M. Z. (2018). Passive thermal performance prediction and multi-objective optimization of naturally-ventilated underground shelter in Malaysia. Renewable Energy, 123, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.022>
- Mukhtar, A., Yusoff, M. Z., & Ng, K. C. (2019). The potential influence of building optimization and passive design strategies on natural ventilation systems in underground buildings: The state of the art. Tunnelling and Underground Space Technology, 92(December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103065>
- Netam, N., Sanyal, S., & Bhowmick, S. (2019). Assessing the Impact of Passive Cooling on Thermal Comfort in Lig House Using Cfd. Journal of Thermal Engineering, 5(5), 414–421. <https://doi.org/10.18186/THERMAL.623212>
- Novák, V., Perfilieva, I., & Močkoř, J. (1999). Mathematical Principles of Fuzzy Logic. In Mathematical Principles of Fuzzy Logic (Issue December 2014). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Olivier Bonnefoy. (2020). Mécanique des fluides et transferts.
- Othilia, E. (2013). Geodesic Structures. International Journal of Education and Research, 1(5), 2. www.ijern.com
- Othman, M. Y., Hamid, S. A., Tabook, M. A. S., Sopian, K., Roslan, M. H., & Ibarahim, Z. (2016). Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study. Renewable Energy, 86, 716–722. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.061>

- Ouarri Kada, E. Z. (2015). Simulation et Modélisation des Caractéristiques électrique C(V) et I(V) d'une Jonction p-n : Application à la cellule solaire organique à base de ITO/MoO₃/CuPc/C60/Alq₃/MoO₃/Al/Se.
- Oudrane, A. (2018). Contribution à la Modélisation et au Développement des Systèmes de Chauffage Solaire à Usage Individuel.
- Ozel, M, & Ozel, C. (2012). Comparison Of Thermal Performance Of Different Wall Structures. Hefat 2012 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 16 – 18 July 2012 Malta, July, 674–679.
- Ozel, Meral. (2013). Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. *Energy Conversion and Management*, 66, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.002>
- Pahlavana, S., Jahangirib, M., Shamsabadic, A. A., & Khechekhouchd, A. (2019). Feasibility study of solar water heaters in Algeria, a review. *Journal of Solar Energy Research Vol*, 4(1), 23–29.
- Patankar, S. ., & Spalding, D. . (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(10), 1787–1806.
- Porras-amores, C., Mazarrón, F. R., Cañas, I., & Villoría, P. (2019). Natural ventilation analysis in an underground construction : CFD simulation and experimental validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90(May), 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.023>
- Posselt, G., Booij, P., Thiede, S., Fransma, J., Driessen, B., & Herrman, C. (2015). 3d Thermal Climate Monitoring in Factory Building. *Conference on Life Cycle Engineering*, 29, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.178>
- Povolotskaya, E. (2017). Doctoral thesis Enhancement of the Selected Management and Planning Quality Control Tools. *Imago Mundi*, 69(1), 134–136. <https://doi.org/10.1080/03085694.2016.1242865>
- Prakash, R., & Singh, S. (2016). Designing and Modelling of Solar Photovoltaic Cell and Array. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(2), 35–40. <https://doi.org/10.9790/1676-1102033540>
- Quintessences, <http://quintessences.unblog.fr/2014/02/11/taddart-ou-la-maison-traditionnelle-du-mزاب/>, (Consulté le 11 Novembre 2020)
- Radhia, D. (2018). Modélisation du vieillissement d ' un e cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d ' encapsulation. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences de l ' ingénieur, Université de boumerrdes.
- Rasmussen, K. (1997). Calculation Methods for the Physical Properties of Air used in the Calibration of Microphones. DTU Library Technical Information Center of Denmark.
- Roche, M. (1973). LE M'ZAB Architecture Ibadite en Algérie.
- Rojas, R. (1996). Neural Networks A Systematic Introduction. <https://doi.org/10.7312/zuri90466-007>
- Saifi, N. (2015). Contribution a La Conception Des Batiments a Faible Consommation D'Energie Dans Les Zones Arides.

- Saifi, N., Settou, N., & Dokkar, A. (2015). Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger in South East Algeria. 2015 6th International Renewable Energy Congress, IREC 2015. <https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110955>
- Sakr, M. M. (2006). Learning Lessons from Matmata. *Sustainable Architecture and Development*, 283–296.
- Savvyleo, <https://savvyleo.com/world-history/ancient-china/houses/>, (Consulté le 11 Novembre 2020)
- Sehli, A., Hasni, A., & Tamali, M. (2012). The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria. *Energy Procedia*, 18, 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.061>
- Sellami, R., Merzouk, N. K., Amirat, M., Chekrouni, R., Ouhib, N., & Hadji, A. (2016). Market potential and development prospects of the solar water heater field in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.043>
- Shan, M., Hwang, B. gang, & Wong, K. S. N. (2017). A preliminary investigation of underground residential buildings: Advantages, disadvantages, and critical risks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70(July), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.004>
- 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>
- SIKU-Silenta manufacturer, <https://www.conrad.com/en/p/siku-silenta-wall-and-ceiling-fan-292-m-h-15-cm-560827.html>, (Consulté le 14 Octobre 2018).
- Soler, L. (1999). *Philosophia Scientiæ*.
- Stéphane Petibon. (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. 145.
- Subramanian, R. S. (2020). Continuity Equation. Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University, Potsdam, New York 13699, July 2019.
- Swami, R. (2012). Solar Cells. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(7). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00426-0>
- Tecsol. (2002). Manuel du chauffe eau solaire collectif, formation tunis 2002.
- The Engineering ToolBox, https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html, (Consulté le 22 Mars 2017)
- Traoré, I. (2018). Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois.
- Trnsys16. (2016). Transient System Simulation Program 2016.
- 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, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.004>
- Wagner, C. (2020). La coupole Pour une structure esthétique et historique de la société. GRIN, May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22137.49765>

- Weather Underground, <https://www.wunderground.com/history/daily/dz/metlili/DAUG>, (Consulté le 18 Aout 2017)
- Werner, J. B., Raphaël, B., Jürg, L., & Alain, E. (2010). Science et technologie des aliments: principes de chimie des constituants et de technologie des procédés.
- Yau, Y. H., Poh, K. S., & Badarudin, A. (2018). An investigation of thermal environment of an existing UFAD system in a high-rise office building in the tropics. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16(2), 313–322. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0319-1>
- Yettou, F., Gama, a, Hamouda, C., & Malek, a. (2008). Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux. *Revue Des Energies Renouvelables*, 11(1), 119–128. http://www.webreview.dz/IMG/pdf/etude_et_realisation_d_un_bon.pdf
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture* (Issue August). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819657-1.00001-3>
- Yu, J., Kang, Y., & Zhai, Z. (John). (2020). Advances in research for underground buildings: Energy, thermal comfort and indoor air quality. *Energy and Buildings*, 215, 109916. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109916>
- Zadeh, L A. (1974). The Concept Of A Linguistic Variable And Its Application To Approximate Reasoning.
- Zadeh, Lotfi A. (1988). Fuzzy logic. University of California, Berkeley, 1177–1200. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_73
- Zhu, J., Tong, L., Li, R., Yang, J., & Li, H. (2020). Annual thermal performance analysis of underground cave dwellings based on climate responsive design. *Renewable Energy*, 145, 1633–1646. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.056>

Résumé : Dans les régions arides, le besoin de refroidissement s'amplifie pour répondre aux exigences thermiques dans les bâtiments. Le refroidissement des locaux par des climatiseurs engendre une forte consommation électrique, ce qui nécessite l'intégration d'autres techniques pour réduire ces dépenses. La ventilation naturelle est une technique courante pour baisser la température interne dans les maisons traditionnelles et les constructions bioclimatiques. Dans ce travail, on utilise une ventilation légèrement forcée pour refroidir un local semi souterrain qui montre une forte performance. Pour le premier étage, les besoins énergétiques sont relativement élevés et qui peuvent être maîtrisé par une bonne organisation de l'occupation des structures de la résidence et l'intégration des connections par des tubes échangeurs de chaleur air-sol. L'alimentation électrique par les panneaux photovoltaïques nécessite une rationalisation et une bonne maîtrise de la gestion d'énergie.

Mots clés : énergie géothermique, énergie solaire photovoltaïque, local semi-souterrain, confort thermique, refroidissement passif

Abstract : In arid regions, the need for cooling increases to meet thermal requirements in buildings. The cooling of buildings by air conditioners generates high electricity consumption, which requires the integration of other techniques to reduce these expenses. Natural ventilation is a common technique for reducing the internal temperature in traditional houses and bioclimatic buildings. In this work, slightly forced ventilation is used to cool a semi-underground room which shows a strong performance. For the first floor, the energy needs are relatively high which can be mastered by a good occupation organization of the residence structures and the integration of the connections by earth air heat exchanger tubes. Electricity supply by photovoltaic panels requires rationalization and good mastery of energy management.

Keywords: geothermal energy, photovoltaic solar energy, semi-underground room, thermal comfort, passive cooling

المخلص

باستخدام المباني تبريد يؤدي. المباني في الحرارية المتطلبات لتلبية التبريد إلى الحاجة تزداد الجافة، المناطق في هي الطبيعية التهوية. النفقات هذه لتقليل أخرى تقنيات تكامل يتطلب الذي الأمر ، الكهرباء استهلاك زيادة إلى المكيفات استخدام يتم العمل، هذا في. الحيوي المناخ ذات والمباني التقليدية المنازل في الداخلية الحرارة درجة لخفض شائعة تقنية الطاقة احتياجات تقييم ان ، لأول للطابق بالنسبة. قوي أداء على يدل مما الأرض تحت شبه غرفة لتبريد قليلاً قسرية تهوية المبادلات أنابيب بواسطة الوصلات وتكامل الإقامة لهياكل جيد احتلال تنظيم خلال من إتقانه يمكن والذي نسبياً عالي الطاقة لإدارة جيد وإتقان ترشيد و الكهروضوئية الألواح طريق عن الكهرباء تزويد يتطلب. الأرضية-الهوائية

الراحة الأرض، تحت شبه غرفة، ضوئية-الكهرو الشمسية الطاقة الأرضية، الحرارية الطاقة: **المفتاحية الكلمات** السلبي التبريد الحرارية،