

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI
DE CHLEF



Faculté de technologie
Département de génie mécanique

ECOLE DOCTORALE ENERGIES RENOUVELABLES

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Magistère en génie mécanique

Option : ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

*Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance
énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie*

Soutenu le : 11 décembre 2011

Présenté par :

MISSOUM MOHAMMED

Dirigé par :

HAMIDAT ABDERRAHMANE

Devant le jury :

Hocine Abdelkader	MC/A	UHB Chlef	Président
Belmadani Bachir	Professeur	UHB Chlef	Examineur
Hadj-Arab	Directeur de recherche	CDER	Examineur
Hamidat Abderrahmane	Directeur de recherche	CDER	Encadreur
Loukarfi Larbi	Professeur	UHB Chlef	Co-encadreur

PROMOTION 2010-2011

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur A.Hamidat, mon directeur de mémoire et je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Mes vifs remerciements à Monsieur Loukarfi.L, professeur à l'université de Chlef qui m'a initié à assurer ma future tâche, ainsi pour ses conseils fructueux et ses encouragements.

Je remercie sincèrement Monsieur Hadj-Arab, Directeur de recherche au CDER d'avoir accepté de faire partie du jury.

Je remerci aussi Monsieur Hocine Abdelkader, maître de conférence à l'université de Chlef d'avoir accepté la présidence du jury.

Mes remerciements à Monsieur Belmadani Bachir, professeur à l'université de Chlef d'avoir accepté de juger ce travail.

Je saisis cette occasion pour remercier tous les enseignants de l'université de Chlef et à tous ceux qui ont contribué à notre bonne formation.

Je remercie tous mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces années de recherche.

Enfin, merci à ma famille, à vous qui m'avez soutenu et avez su être mon inspiration quand j'avais des baisses de régime. Merci à mes chers parents qui sans eux je ne serais parvenu là où je suis. Un grand merci à mon frère et toutes mes sœurs, à ma chère femme qui était toujours à mes côtés et mon fils Larbi et ma petite fille Safaa.

Sommaire

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	10
Nomenclature.....	12
Introduction générale.....	15

Chapitre 1 :

Irradiation solaire

1.1 Introduction	17
1.2 Le soleil.....	17
1.2.1 Présentation du soleil.....	17
1.2.2 Mouvement de la terre autour du soleil.....	18
1.2.3 Trajectoire apparente du soleil.....	19
1.2.4 Coordonnées du soleil.....	19
- Coordonnées équatoriales.....	19
- Coordonnées horizontales du soleil.....	22
1.3 Coordonnées terrestres.....	23
1.3.1 Longitude.....	23
1.3.2 Altitude.....	24
1.3.3 Latitude	24
1.4 Orientation et inclinaison d'une surface.....	24
1.4.1 Azimute α	24
1.4.2 Angle d'inclinaison β	25
1.5 Rayonnement solaire	25
1.5.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	25
1.5.2 Constante solaire.....	27
1.5.3 Masse d'air.....	30
1.5.4 Durée d'insolation.....	30
1.5.5 Composition du rayonnement solaire	30
- Rayonnement direct	30
- Rayonnement diffus	31

- Rayonnement réfléchi (L'albédo)	31
- Rayonnement global.....	32
1.5.6 Nomenclature des différents instruments de mesure du rayonnement	32
- Pyrradiomètre.....	32
- Pyranomètre.....	33
- Pyrhéliomètre	33
- Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre	33
- Héliographe	33
1.6 Estimation de l'irradiation solaire	33
1.6.1 Irradiation sur un plan horizontal.....	33
1.6.2 Estimation de l'éclairement horaire sur une surface inclinée.....	38
- Eclairement direct.....	38
- Eclairement diffus.....	39
- Eclairement réfléchi.....	39
1.7 Irradiation global extraterrestre G_0	40
1.8 Modèles de la température ambiante et de jonction.....	41
1.8.1 Modèle de la température ambiante	41
1.8.2 Modèle de la température de jonction	42
1.9 Conclusion	42

Chapitre 2 :

Présentation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

2.1 Introduction.....	43
2.2 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque.....	43
2.3 Systèmes photovoltaïques pour l'habitat.....	44
2.3.1 Isolé	44
2.3.2 Connecté au réseau.....	45
- Avantages.....	45
- Inconvénients.....	46
2.4 Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	46
2.4.1 Générateur photovoltaïque	46
- Principe photovoltaïque	47

- Paramètres de cellules photovoltaïques	49
- Différents types des cellules solaires	51
- Association des cellules photovoltaïques	53
2.4.2 Le convertisseur	57
- Définition.....	57
- Convertisseurs continu/continu (DC/DC).....	57
- Onduleurs DC/AC.....	58
- Onduleurs pour couplage au réseau.....	61
2. 5 Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	65
2.5.1 Système PV connecté directement au réseau.....	65
2.5.2 Systèmes à bus continu intermédiaire	66
2.6 Options de raccordement.....	67
2.6.1 Injection de la totalité de la production	68
2.6.2 Injection du surplus de production	69
2.7 Conclusion.....	69

Chapitre 3 :

Modélisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

3.1 Introduction	70
3.2 Présentation du système proposé pour l'étude.....	70
3.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	71
3.3.1 Générateur photovoltaïque idéal.....	71
3.3.2 Générateur photovoltaïque réel	72
3.3.3 Modèles de la caractéristique I-V.....	74
- Modèle à une diode	74
- Modèle à deux diodes	74
- Modèle explicite.....	75
- Modèle à quatre paramètres	75
3.3.4 Simulation de modèle à une diode par Matlab.....	76
- Calcul du courant photonique.....	76
- Calcul du courant de saturation.....	77
- Calcul de la température de jonction.....	77

- Résolution de l'équation I(V).....	78
- Choix du module photovoltaïque	79
- Résultats de la simulation.....	81
3.3.5 Méthodes de recherche du point optimal de fonctionnement.....	88
- Méthode de perturbation et observation.....	88
- Algorithme d'incrémentation de l'inductance.....	90
3.4 Modélisation du système de conversion (convertisseur).....	92
3.4.1 Modélisation énergétique d'un onduleur type	92
3.4.2 Choix d'un onduleur	93
3.5 Conclusion.....	94

Chapitre 4:

Etude des différents concepts de bâtiments performants

4.1 Introduction.....	95
4.2 Principaux labels nationaux et internationaux.....	95
4.2.1 Les labels français.....	95
4.2.2 PassivHaus (Allemagne)	96
4.2.3 ZERO ENERGY BUILDING (USA).....	97
4.2.4 MINERGIE® (Suisse).....	98
4.2.5 Normes et labels algériens	100
4.3 Maisons « bioclimatiques ».....	101
4.3.1 Définitions	101
4.3.2 Principes de base.....	102
4.3.3 Caractéristiques des bâtiments bioclimatiques.....	102
- Orientation.....	103
- Stratégie du froid et du chaud.....	103
- Organisation spatiale des pièces.....	104
- Inertie thermique	105
- Isolation.....	105
4.4 Maisons « passives »	107
4.4.1 Introduction.....	107
4.4.2 Apports gratuits	108

- Apports solaires passifs.....	108
- Principes de régulation naturelle en hiver.....	109
- Principes de régulation naturelle en été.....	110
4.4.3 Apports internes	112
4.4.4 Isolation thermique.....	112
4.4.5 Points critiques de l'enveloppe	113
- Fenêtre	113
- Ponts thermiques	115
4.4.6 Ventilation	115
- Principe général	116
- Récupération de la chaleur	117
4.4.7 Besoin en énergie	118
4.5 Maisons à basse consommation	119
4.6 Bâtiment « zéro énergie »	120
4.7 Maisons à énergie positive	121
4.8 Conclusion.....	122

Chapitre 5:

Performances énergétiques d'une habitation située dans la région de Chlef

5.1 Introduction.....	123
5.2 Caractéristiques géographiques du site.....	123
5.3 Description de l'habitation étudiée.....	124
5.4 Consommations énergétiques de l'habitation.....	124
5.5 Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque.....	126
5.5.1 L'ensoleillement.....	126
5.5.2 Etude du profil de consommation électrique.....	126
5.5.3 Proposition d'un profil de consommation énergétique.....	128
5.5.4 Répartition de la consommation électrique dans le foyer.....	129
5.5.5 Caractéristiques du système PV connecté au réseau.....	131
5.5.6 Dimensionnement du champ PV.....	131
- Calcul de l'énergie électrique totale journalière.....	131
- Calcul de la puissance crête(P_C) du générateur photovoltaïque nécessaire.....	131

- Nombre nécessaire des modules solaires constituant le champ photovoltaïque ...	132
- Calcul de la surface occupée par le champ PV.....	132
5.6 Simulation des performances électriques.....	135
5.6.1 Etapes de simulation	135
5.6.2 Production d'électricité.....	140
5.6.3 Consommation d'électricité.....	140
5.6.4 Energie électrique achetée du réseau.....	141
5.6.5 Energie électrique vendue au réseau.....	142
5.6.6 Solde d'énergie achetée du réseau.....	142
5.6.7 Variation horaire Puissance du générateur PV.....	143
5.6.8 Variation horaire de la quantité d'électricité achetée du réseau.....	144
5.6.9 Variation horaire de la quantité d'électricité vendue au réseau.....	144
5.7 Modélisation thermique de l'habitat individuel.....	145
5.7.1 Présentation du logiciel TRNSYS.....	145
5.7.2 Architecture de l'habitation.....	145
5.7.3 Déroulement de la simulation	147
5.7.4 Définition des zones.....	147
5.7.5 Composition des parois.....	148
5.7.6 Paramètres de la simulation.....	150
5.7.7 Résultats de la première simulation.....	153
5.7.8 Résultats de la deuxième simulation	155
5.8 Conclusion.....	159
Conclusion générale.....	160
Références bibliographiques.....	162
Annexe	164

Liste des figures

Figure 1.1: Le mouvement de la terre autour du soleil.....	18
Figure 1.2: Repérage de la position du soleil.....	19
Figure 1.3: Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année.....	20
Figure 1.4: Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai.....	21
Figure 1.5: Coordonnées horizontales du soleil.....	23
Figure 1.6: Cordonnée terrestre.....	24
Figure 1.7: Orientation et inclinaison d'une surface.....	25
Figure 1.8: Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	26
Figure 1.9: La constante solaire.....	27
Figure 1.10 : Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse.....	28
Figure 1.11 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs, Air Mass.....	29
Figure 1.12: Normes de mesures du spectre de l'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	29
Figure 1.13 : Composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.....	32
Figure 1.14: Irradiation global extraterrestre.....	40
Figure 2.1 : Système PV raccordé au réseau.....	43
Figure 2.2 : structure d'un système PV autonome.....	44
Figure 2.3 : structure d'un système PV connecté au réseau.....	45
Figure 2.4: Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie.....	48
Figure 2.5: Production d'électricité par la séparation électron-trou.....	49
Figure 2.6 : caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	50
Figure (2.7): Cellule, Module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass).....	53
Figure 2.8: Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.....	54
Figure 2.9: caractéristique résultante d'un groupement en parallèle n_p cellules identiques.....	55
Figure 2.10: caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_s+n_p) cellules	

identiques.....	52
Figure 2.11 : a- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation I_{PV}	56
Figure 2.12 : exemple de convertisseur DC/DC vers le haut.....	57
Figure 2.13: convertisseur typique DC/DC vers le bas.....	58
Figure 2.14 : Circuit simple utilisant un pont de transistors.....	59
Figure 2.15: Filtrage de la tension par l'inductance de sortie.....	59
Figure 2.16: Typologie des systèmes Onduleur Centralisé.....	62
Figure 2.17: Typologie des systèmes Onduleur Chaîne.....	63
Figure 2.18 : Typologie des systèmes Onduleur Module	64
Figure 2.19 : Architecture du système PV avec un bus en courant alternatif (AC).....	66
Figure 2.20: Architecture du système PV avec un bus en courant continu (DC).....	67
Figure 2.21: Injection de la totalité de production sur le réseau.....	68
Figure 2.22: Injection du surplus de production sur le réseau.....	69
Figure 3.1 : Système PV raccordé au réseau.....	70
Figure 3.2 : modèle simple d'une cellule PV.....	72
Figure 3.3 : Modèle de la cellule PV.....	73
Figure 3.4: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	74
Figure 3.5 : circuit équivalent du modèle à quatre paramètres.....	76
Figure 3.6 : Organigramme de calcul de courant et tension de sortie du module.....	80
Figure 3.7: Caractéristique $I(V)$ d'un module solaire.....	81
Figure 3.8 : Caractéristique $P(V)$ d'un module solaire.....	81
Figure 3.9 : Les différentes zones de caractéristiques $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque PV.....	82
Figure 3.10 : Caractéristique $I-V$ pour différentes éclairément.....	83
Figure 3.11 : Caractéristique $P-V$ pour différente éclairément.....	83
Figure 3.12: Caractéristiques $I-V$ pour différentes températures.....	84
Figure 3.13 : Caractéristique $P-V$ pour différentes températures.....	84
Figure 3.14 : Caractéristiques $I-V$ pour différentes valeurs de résistance série.....	85
Figure 3.15 : Caractéristiques $P-V$ pour différentes valeurs de résistance série.....	85
Figure 3.18: Caractéristiques $I-V$ pour différentes valeurs de résistance shunt.....	86
Figure 3.19 : Caractéristique $P-V$ pour différentes valeurs de résistance shunt.....	86

Figure 3.20 : Points de puissance maximale du générateur PW6110.....	87
Figure 3.21 : Point de puissance maximale d'un panneau PV.....	89
Figure 3.22 : Organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation.....	89
Figure 3.23 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale.....	91
Figure 3.24 : Rendement type d'un onduleur en fonction de taux charge.....	93
Figure 3.25 : Courbe de rendement SUNNY BOY 4000TL	94
Figure 4.1 : Schématisation des principes de la conception d'une maison passive.....	97
Figure 4.2 : Exigence des standards MINIERGIE [®] et MINERGIE [®] -P.....	99
Figure 4.3 : Comparaison des pertes d'une maison bien isolée et une maison non isolée.....	101
Figure 4.4 : Configuration d'une habitation bioclimatique.....	102
Figure 4.5 : stratégie du froid.....	104
Figure 4.6 : stratégie du chaud.....	104
Figure 4.7 : Illustration de quelques principes d'architecture bioclimatique.....	105
Figure 4.8 : gain solaire et pertes thermiques des fenêtres ordinaires et à faible E.....	106
Figure 4.9 : Comparaison des performances de simple, double et triple vitrages.....	107
Figure 4.10 : exemple d'une maison bioclimatique près de Stavelot.....	107
Figure 4.11 : Besoin de chauffage selon la proportion de vitrages.....	109
Figure 4.12 : Journée ensoleillée d'hiver.....	110
Figure 4.13 : Avantage de la végétation en été et en hiver.....	111
Figure 4.14 : Journée ensoleillée d'été.....	111
Figure 4.15 : Triple vitrage.....	114
Figure 4.16 : Alternative pour le triple vitrage.....	114
Figure 4.17 : Liens entre isolation, étanchéité à l'air et ventilation.....	116
Figure 4.18 : Les quatre systèmes de ventilation.....	117
Figure 4.19 : Principe de la ventilation double-flux.....	118
Figure 4.20 : Quartier Kronsberg de Hanovre (Allemagne).....	118
Figure 4.21 : exemple maison à basse énergie à Gembloux.....	120
Figure 4.22 : La maison ZEN.....	121
Figure 4.23 : exemple des bâtiments à énergie positive à Freiburg en Allemagne.....	122
Figure 5.1 : Variation de la température en fonction du temps.....	123
Figure 5.2 : Bilan de la consommation électrique (KWh) 2008 de l'habitation étudiée.....	125

Figure 5.3: Bilan de la consommation Gaz (KWh) 2008 de l'habitation étudiée.....	125
Figure 5.4: répartition de la consommation électrique (1 ^{er} cas).....	130
Figure 5.5 : répartition de la consommation électrique (2 ^{ème} cas).....	130
Figure 5.6 : Dimensions du panneau PV.....	133
Figure 5.7 : Schéma de disposition du panneau sur le toit.....	134
Figure 5.8 : Panneau solaire photovoltaïque de l'habitation étudiée.....	135
Figure 5.9 : Vue en plan de l'habitation étudiée.....	136
Figure 5.10 : Vue coté sud de l'habitation étudiée.....	138
Figure 5.11: Profile d'occupation, semaine.....	141
Figure 5.12: Profile d'occupation, week-end.....	141
Figure 5.13: Fenêtre d'assemblage du projet.....	143
Figure 5.14: Besoins en chauffage (kWh).....	143
Figure 5.15: Besoins en climatisation.....	144
Figure 5.16 : Besoins en chauffage (kWh) (2 ^{ème} simulation).....	146
Figure 5.17 : Comparaison des besoins en chauffage (kWh).....	146
Figure 5.18 : Besoins en climatisation (kWh) (2 ^{ème} simulation).....	147
Figure 5.19 : Comparaison des besoins en climatisation (kWh).....	147
Figure 5.20 : Besoins en climatisation sans apports internes.....	148
Figure 5.21 : Consommation totale en fonction de l'épaisseur de l'isolant.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Valeurs énergétiques des photons issues spectre solaire.....	26
Tableau 1.2 : Quelques valeurs d'albédo.....	31
Tableau 2.1 : Caractéristiques techniques des différents systèmes de configuration.....	65
Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques du module PW6110.....	79
Tableau 3.2 : Point de puissance maximale en fonction de l'irradiation et la température du module PV PW6110.....	88
Tableau 4.1: Répartition des baies vitrées d'une habitation bioclimatique.....	103
Tableau 4.2 : Epaisseur des différents matériaux.....	113
Tableau 5.1 : Bilan de la consommation énergétique de l'habitation étudiée (année 2008).....	124
Tableau 5.2: Durée d'ensoleillement du site de Chlef.....	126

Tableau 5.3 : consommations électriques de l’habitation par type de charges.....	127
Tableau 5.4 : Nouvelles consommations électriques de l’habitation par types de charges.....	128
Tableau 5.5 : Répartition de la consommation électrique.....	129
Tableau 5.6 : Caractéristiques du système PV étudié.....	131
Tableau 5.7 : zones de la maison.....	137
Tableau 5.8: Composition des parois de la maison originale.....	139
Tableau 5.9 : Composition des parois de la maison avec les solutions.....	139
Tableau 5.10 : Puissance dégagée par les appareils électroménagers.....	142
Tableau 5.11 : Besoins en chauffage et en climatisation de la maison originale.....	144
Tableau 5.12 : Besoins en chauffage et en climatisation de la maison économique.....	145

Nomenclature

Symbole	Unité	Définition	
J	Jour	Numéro du jour de l'année	
TSV	Heure	Temps universel	
TL		Temps légal	
λ	(°)	Longitude du lieu	
δ		Déclinaison solaire	
H		Angle horaire du soleil	
a		Azimut	
h		Hauteur	
φ		Latitude	
β		Angle d'inclinaison	
λ		μm	Longueur d'onde
p	Bar	Pression atmosphérique	
G_d	Wh/m^2	Irradiation globale horizontale journalière	
D_d		Irradiation diffuse horizontale journalière	
B_d		Irradiation directe horizontale journalière	
G_{ed}		Irradiation globale extraterrestre journalière	
G_h		Irradiation globale horizontale horaire	
G_{eh}		Irradiation globale extraterrestre horaire	
D_h		Irradiation diffuse horizontale horaire	
K_d		-	Fraction diffuse
K_t	Indice de clarté de l'atmosphère		
M_t	Indice de clarté horaire de l'atmosphère		
M_d	Fraction diffuse horaire		
G_0	Irradiation globale extraterrestre		
B	Eclairement direct		
D	Eclairement diffuse		
R	Eclairement réfléchi		
θ_s	(°)		Angle de l'incidence
θ_{zs}			Angle zénithal

ρ	-	Albédo du lieu
ε	-	Correction de la distance solaire
h_s	(°)	Angle d'altitude solaire
T_a	°C	Température ambiante
T_j		Température de la jonction
I_{ph}	A	Photo-courant
I_D		Courant traversant la diode
I_s		Courant de saturation de la diode
I		Intensité aux bornes du générateur
V_t	V	Tension thermique
V		Tension aux borne du générateur
K	J/k	La constant de Boltzmann
q	$1.6.10^{-19}$ coul	Charge de l'électron
E_g	eV	Energie de gap
A	-	le facteur d'idéalité de la diode
R_s	Ω	Résistance série
R_{sh}	Ω	Résistance shunt
V_{oc}	V	Tension à circuit ouvert
I_{sc}	A	Courant de court-circuit
V_m	V	Tension au point de puissance maximale
I_m	A	Courant au point de puissance maximale
P_m	W	Puissance crête du module
G	W/m^2	Irradiation effective
G_{ref}		Irradiation de référence
T	°C	Température effective
T_{ref}		Température de référence
μ_{Ics}	-	Coefficient de température du photo-courant

I_{phref}	A	Photo-courant de référence
NOCT		Température nominale de fonctionnement
n_s	-	Nombre de cellule en série
n_p	-	Nombre de cellule en parallèle
$I_{scréf}$		Courant de saturation de référence
P_{MMT}	W	Point de puissance maximale
I_{OPT}	A	Courant optimale
V_{OPT}	V	Tension optimale
P_{OPT}	W	Puissance optimale
U_{DC}	V	Tension du bus continu
I_{DC}	A	Courant du bus continu
P_{DC}	W	Puissance du bus continu
P_{AC}	W	Puissance du bus alternatif
τ	-	Taux de charge
P_n	W	Puissance nominale de l'onduleur
P_{ch}	W	Puissance à la sortie de l'onduleur
η_{ond}	-	Rendement onduleur
E_{AC}	Wh/j	Besoin énergétique journalier
E_T	Wh/j	Energie électrique totale journalière
P_C	W	Puissance crête du générateur PV
N_t	modules	Nombre de modules totales
N_p	modules	Nombre de module en parallèles
N_s	modules	Nombre de modules en série
S_p	m^2	Surface du panneau solaire
U	$W/m^2.K$	Coefficient de déperdition thermique

Introduction générale

Les besoins en énergie de toutes sortes sont en croissance partout sur la planète. L'épuisement annoncé des énergies fossiles et les problèmes climatiques dus aux gaz à effet de serre, ont amené plusieurs pays à accorder un rang de priorité élevé à cette question.

Depuis quelques dizaines d'années, les approvisionnements énergétiques sont devenus un problème de plus en plus préoccupant, non seulement en raison des difficultés croissantes liées aux produits pétroliers, mais aussi parce qu'il est aujourd'hui nécessaire d'admettre qu'à l'échelle de notre planète les ressources énergétiques, fossiles ou autres, sont limitées.

L'échauffement climatique de la terre, engagé depuis quelques années, a occasionné une action à l'échelle mondiale pour atténuer les conséquences voire inverser la tendance. A cet effet le réchauffement climatique fait périodiquement l'objet des réunions internationales : Rio de Janeiro(1992), Berlin (1995), Genève (1996), Kyoto(1997), Buenos Aires (1998), La Haye (2000) et Montréal (suivi du protocole de Kyoto 2005). Ces réunions ont pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. [14]

L'Algérie, en ce qui la concerne, fait face aux impacts des changements climatiques, qui aggravent le phénomène de désertification dont elle souffre. Elle a intégré la dimension du développement durable dans ses plans de développement, y compris dans un souci de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. De même qu'elle a adopté des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique et une politique de promotion des énergies renouvelables.

Le domaine du bâtiment, très énergivore, apparaît au premier plan de cette tendance.

A l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment représente de 30 à 40 % de la consommation totale d'énergie et une forte part des impacts environnementaux. [9] En Algérie, les bâtiments ne font pas exception de cette règle. Le bilan énergétique national montre que le secteur du bâtiment représente une grande part dans la consommation énergétique du pays. En effet, les derniers statistiques donnent un taux supérieur à 45% par rapport à la consommation nationale et elle est en nette croissance pour plusieurs raisons [10], exemple : Accroissement substantiel du parc immobilier, Bas prix des énergies conventionnelles, Augmentation du nombre d'équipements électriques au sein de chaque foyer, Utilisation des équipements électriques non économiques tels que les lampes à incandescence et climatiseurs bas de gamme et moins chères, Absence de conscience et manque de culture sur la maîtrise d'énergie, Désir grandissant des habitants vers le confort.

Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, plusieurs éléments de solutions peuvent être mis en œuvre de manière complémentaire. Du point de vue environnemental, les solutions sont très nombreuses et concernent notamment la rationalisation de l'utilisation des matières premières, la réduction des émissions polluantes et des déchets et le recyclage des matériaux. Du point de vue énergétique, les mesures seront ciblées en priorité sur la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments, l'amélioration de l'efficacité (EE) énergétique des équipements et dans le développement, même modeste, des énergies renouvelables (ER) notamment l'énergie solaire photovoltaïque.

C'est dans cette perspective que l'approche bioclimatique est adoptée. Cette approche permet de réduire la consommation énergétique de l'habitat en utilisant les techniques du solaire passif et actif.

La modélisation et surtout la construction d'une maison individuelle qui produirait ce n'est qu'une part de l'énergie qu'elle consomme représente le meilleur moyen de mettre en application tous les concepts baisse consommation et de production locale d'énergie.

Ainsi, le présent travail de thèse vise à étudier la contribution de l'énergie solaire photovoltaïque dans les performances énergétiques de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie. Le système solaire photovoltaïque est un système connecté au réseau électrique et n'utilise pas de stockage électrochimique. Durant les périodes ensoleillées, l'alimentation est assurée par le système photovoltaïque et durant l'absence du soleil, l'alimentation est tirée du réseau électrique.

Notre travail se divise en cinq chapitres. Après une brève introduction, le premier chapitre présente globalement l'irradiation solaire.

Le chapitre suivant a pour objet de fournir un maximum d'information concernant les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et de parcourir les différentes structures possibles de ces systèmes.

Le troisième chapitre s'intéresse à la modélisation des différents composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau qui nous permettra par la suite de le dimensionner.

Ensuite, le quatrième chapitre définit les différents concepts d'habitations performantes et en présente et illustre les principales nuances et caractéristiques.

Enfin, le chapitre 5 fera l'objet de l'étude des performances énergétiques (électrique et thermique) d'une habitation située à Chlef.

1.1 Introduction

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. « Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète ». Aussi, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [5]

Les diverses applications qui découlent de l'exploitation des rayons solaires sont innombrables. Les technologies solaires les plus répandues s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel.

Les avantages de l'exploitation à plus grande échelle de l'énergie solaire en Algérie sont nombreux : amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, diminution de la consommation en énergie fossile et électrique, création d'emplois à travers les régions de tout le pays, réduction des émissions des gaz à effet de serre et hausse des exportations d'électricité, etc.

Dans ce premier chapitre, nous aborderons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire. A savoir les coordonnées équatoriale et terrestre. Nous décrirons ensuite, le rayonnement solaire et sa composition. Puis, l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface horizontale et inclinée et enfin, les modèles de température ambiante et de jonction.

1.2. Le soleil :

1.2.1 Présentation du soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le soleil est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K.

Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe. Le soleil ne tourne pas comme un corps solide :

- La rotation de l'équateur s'effectue environ dans 27 jours
- Les régions polaires durant 30 jours.

1.2.2 Mouvement de la terre autour du soleil

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers Figure 1.1.

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial, perpendiculaire à cet axe. Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Elle tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s $\approx 365,25$ jours.

La terre tourne avec une vitesse moyenne 29,77 Km/s (vitesse maximale en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. [5]

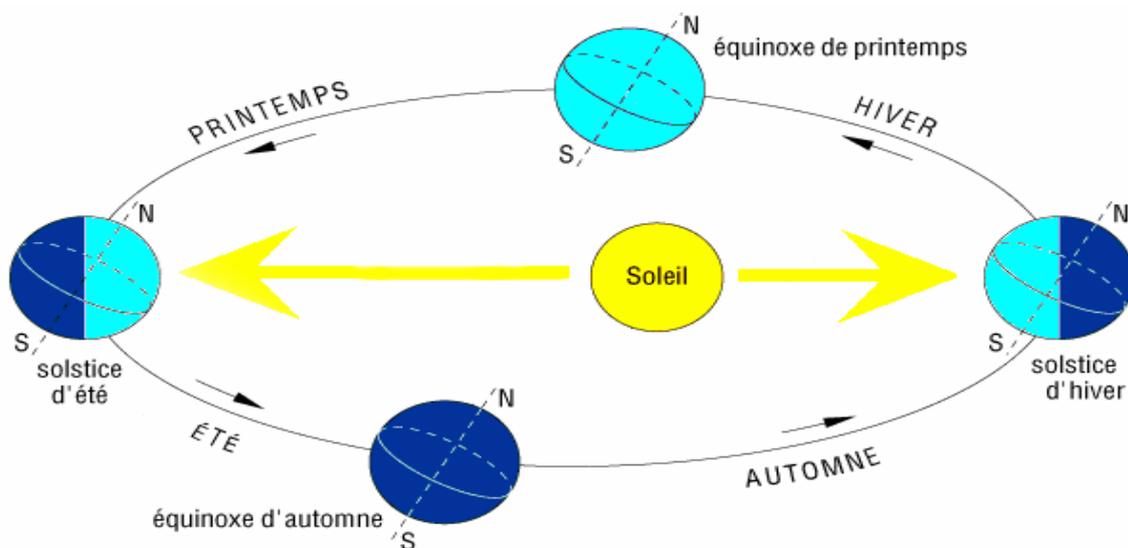


Fig. 1.1: Le mouvement de la terre autour du soleil. [20]

1.2.3 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve, voir figure 1.2.

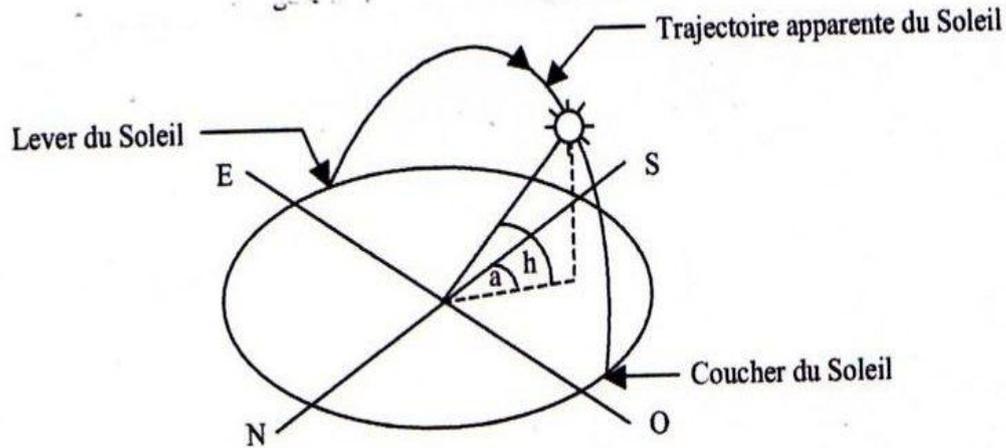


Fig. 1.2: Repérage de la position du soleil [20]

1.2.4 Cordonnées du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents. [5]

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

- Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles.

- Déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation : [5]

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J - 80) \right] \quad (1.1)$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \text{ArcSin} \left[0.389 \times \text{Sin} \left[\frac{360}{365} (J - 82) \right] + 2 \times \text{Sin} \frac{360}{365} (J - 2) \right] \quad (1.2)$$

Avec :

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c.-à-d. varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure 1.3.

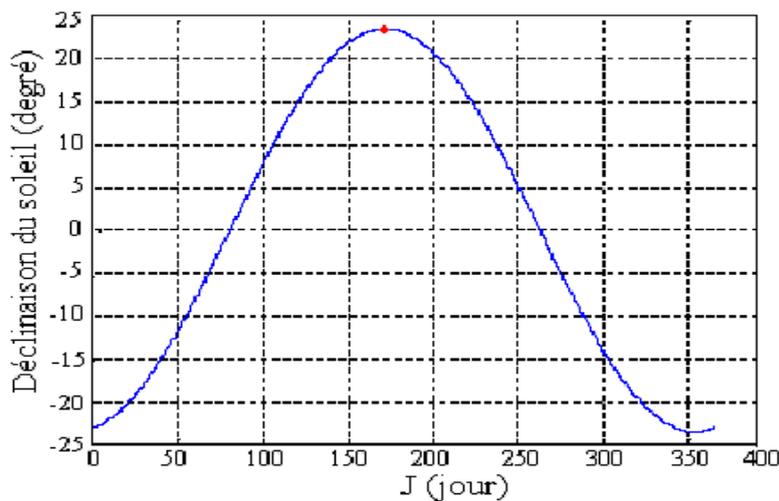


Fig.1.3: Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année J. [5]

δ : varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 < \delta < +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23.45^\circ$.

$\delta=0$ aux équinoxes (E.P, E.A)/ Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe printanier le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour. [5]

$\delta=23.45^\circ$: au Solstice d'été (S.E) (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.

$\delta=-23.45^\circ$: au Solstice d'hiver (S.H) (au 21 décembre).

$\delta > 0$: aux E.P - S.E- E.A

$\delta < 0$: aux E.A –S.H- E.P

- Angle horaire du soleil H :

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation : [5]

$$H = 15(TSV - 12) \quad (1.3)$$

Avec :

$$TSV = TL - TU + \left(\frac{\Delta t + \Delta \lambda}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (1.4)$$

$$\Delta t = 9,87 \times \sin^2\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 7,35 \times \cos\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 1,5 \times \sin\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right)$$

TU : Temps universel : est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

Pour l'Algérie : TU= +1.

TL : Temps légal : temps donné par une montre.

Δt : correction de l'équation du temps.

λ : Longitude du lieu.

$H > 0$: après midi.

$H < 0$: le matin.

$H = 0$: midi TSV.

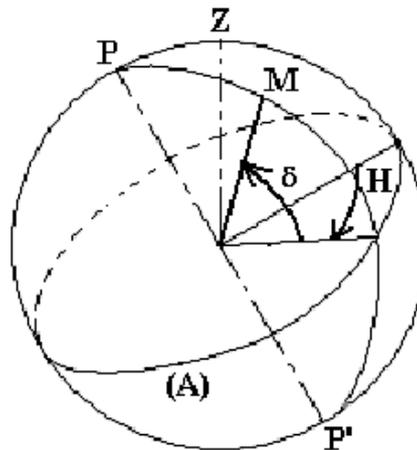


Fig. 1.4: Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai. [20]

- Coordonnées horizontales du soleil

La position du soleil à un instant considéré est donnée par l'azimut du soleil a et son élévation h (voir figure 1.5).

- Azimut (a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du Sud.

L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation : [5]

$$\sin a = \frac{\cos \delta \times \sin H}{\cos h} \quad (1.5)$$

a : varie entre -180° et 180° .

On prend :

- $a > 0$: vers l'ouest.
- $a < 0$: vers l'est.
- $a = 0$: direction du sud.

- Hauteur (h):

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan d'horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante : [5]

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos H + \sin \varphi \times \sin \delta \quad (1.6)$$

La hauteur du soleil varie entre -90° et $+90^\circ$.

- $h = 0$ aux lever et coucher,
- $h > 0$ le jour ;
- $h < 0$ la nuit.

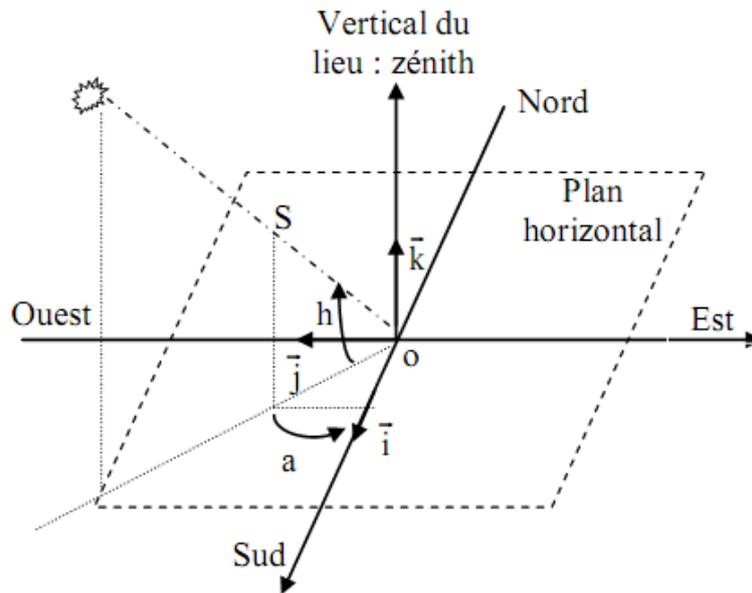


Fig.1.5: Coordonnées horizontales du soleil [6]

I.3 Cordonnées terrestres

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont : la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude, voir figure 1.6.

1.3.1 Longitude

La longitude (λ) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180° . A tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. [5]

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.

1.3.2 Altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). [5]

1.3.3 Latitude

L'angle (φ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

Par convention, le signe (-) est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$.

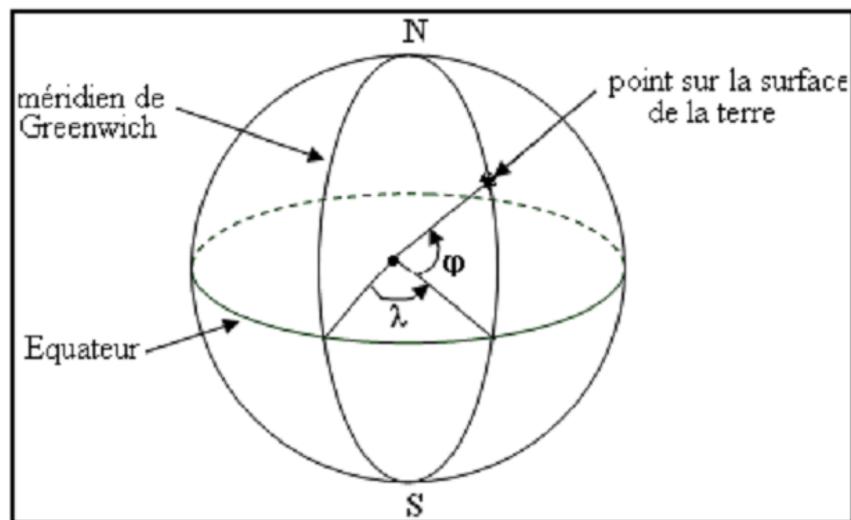


Fig.1.6 : Cordonnée terrestre. [5]

I.4 Orientation et inclinaison d'une surface

I.4.1 Azimute α

C'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du Sud et il désigne l'orientation de la surface de telle sorte que:

$\alpha = -90^\circ$ pour une orientation Est
 $\alpha = 0$ pour une orientation Sud
 $\alpha = 90^\circ$ pour une orientation Ouest
 $\alpha = 180^\circ$ pour une orientation Nord

1.4.2 Angle d'inclinaison β

C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal. L'inclinaison de la surface est désignée par la variable b , choisie de telle sorte que :

$\beta = 0$ pour une surface horizontale
 $\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical
 $\beta = 180^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le bas.

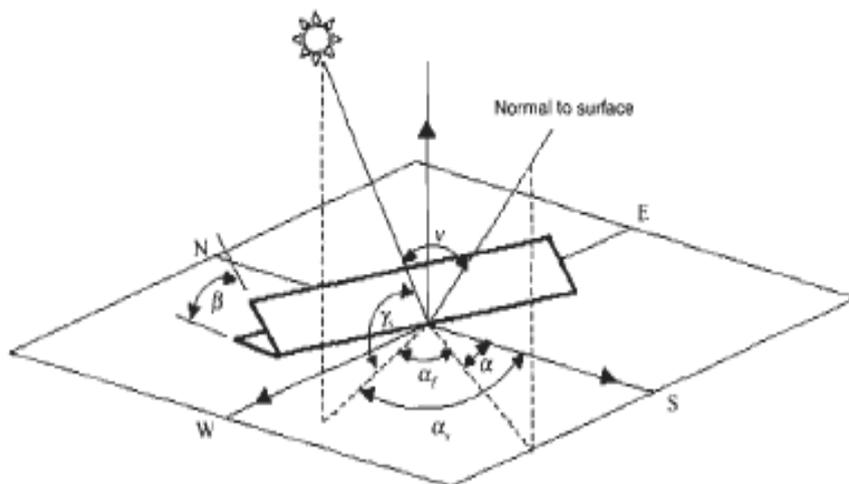


Fig. 1.7: Orientation et inclinaison d'une surface. [5]

1.5 Le rayonnement solaire

1.5.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5 \mu\text{m}$).

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de:

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

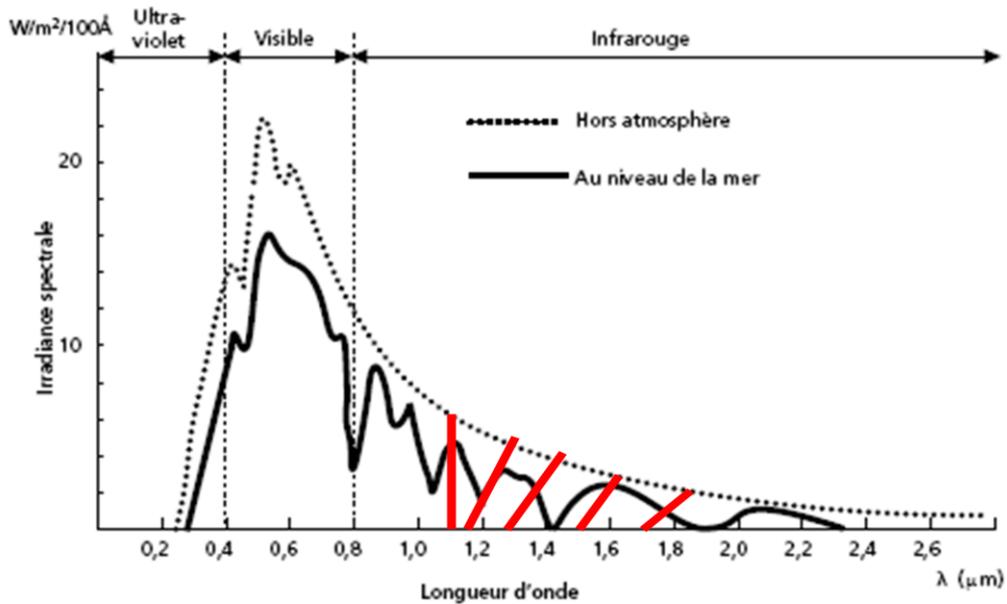


Fig. 1.8 : Analyse spectrale du rayonnement solaire. [5]

Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux. [6]

Tableau 1.1: Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire. [6]

λ (μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global. [6]

1.5.2 Constante solaire

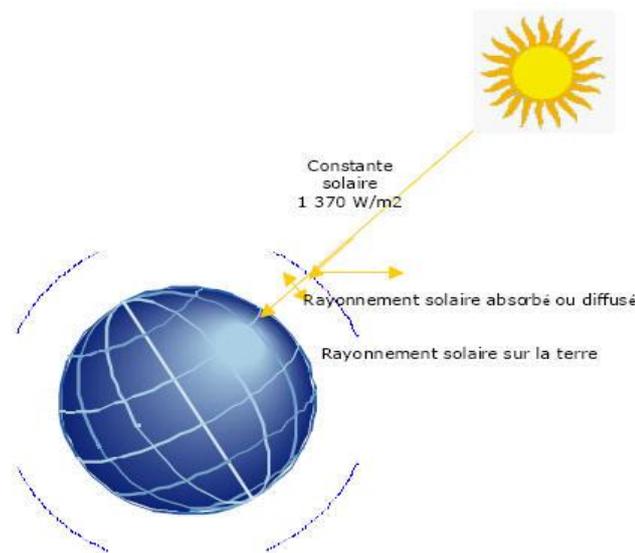


Fig.1.9: La constante solaire.[5]

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Solaire égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 W/m^2 par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse).

1.5.3 Masse d'air

On appelle masse d'air ou Air Mass, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

A l'aide des points O, A et M et l'angle h, la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère:

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (1.7)$$

Donc, l'Air Mass

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (1.8)$$

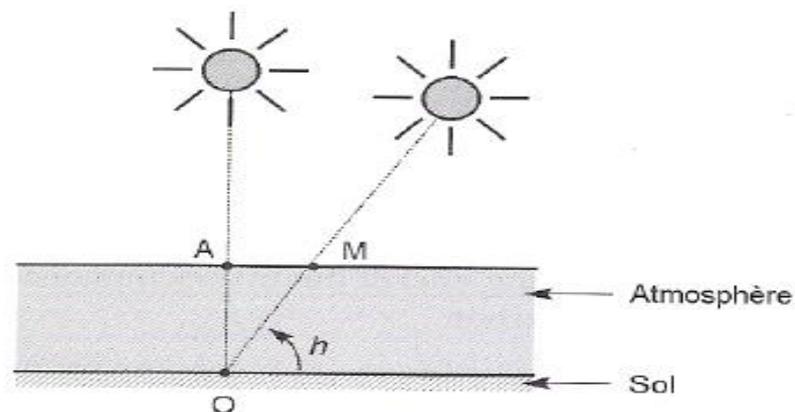


Fig.1.10 : Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse. [5]

Pour un site quelconque :

$$AMX = \frac{1}{\sin(h)} \times \frac{p}{1013} \quad (1.9)$$

p : pression atmosphérique du site considéré (mb)

Et on dit qu'on a les conditions AM1 lorsque le soleil est au zénith, AM2 lorsqu'on a une inclinaison de 30°.

Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM0.

Les courbes ci-dessous figure 1.11 représentent le spectre solaire pour différentes valeurs de Air Mass, noté AM. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0

donc est le spectre solaire hors atmosphère, AM2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au dessus de l'horizon).

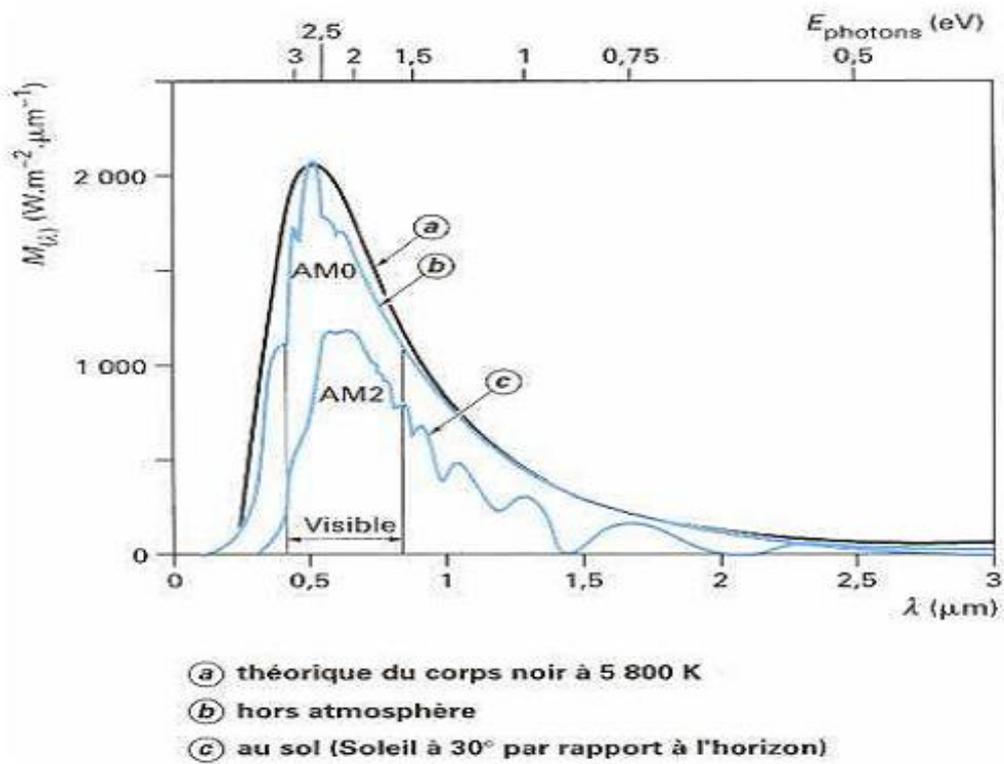


Fig.1.11 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs, Air Mass.[3]

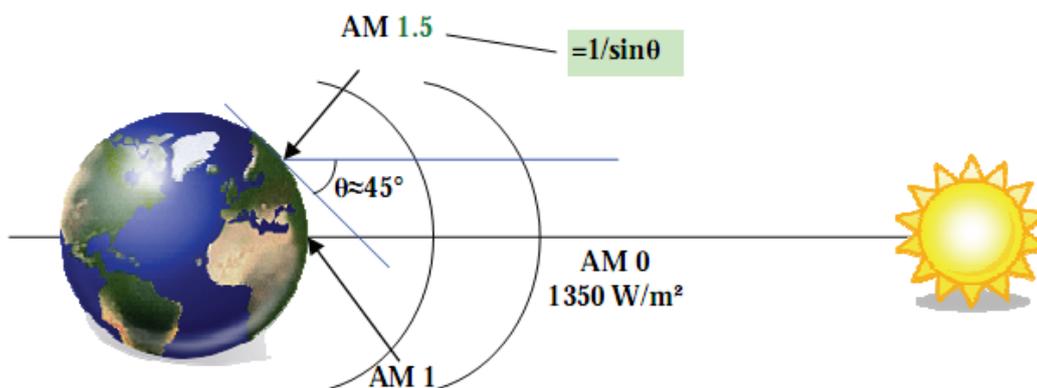


Fig.1.12: Normes de mesures du spectre de l'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [19]

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (1367 W/m^2 pour AM0, 833 W/m^2 pour AM1,5) et d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi les conditions standards de qualifications des cellules sont un spectre AM1,5, une puissance incidente 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

Sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné.

1.5.4 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle-même dépend de la période de l'année considérée. [1]

1.5.5 Composition du rayonnement solaire

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

- Rayonnement direct

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné.

Si I est le rayonnement direct. [12]

Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit :

$$I_h = I \times \sin h \quad (1.10)$$

Avec : h hauteur du soleil.

- Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol. [5]

- Rayonnement réfléchi (L'albédo)

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$L' \text{ albédo } ALB = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad (1.11)$$

Il ya quelques valeurs de L'albédo selon la surface du sol.

Tableau 1.2 : Quelques valeurs d'albédo. [5]

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

- Rayonnement global

- Une surface horizontale

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus. [12]

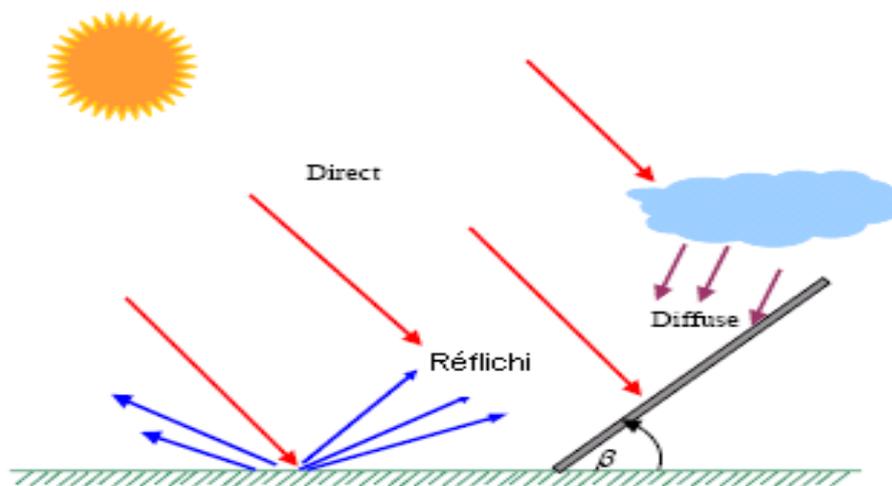


Fig.1.13 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné. [5]

- Une surface inclinée

Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi.

1.5.6 Nomenclature des différents instruments de mesure du rayonnement

- Pyrradiomètre

Instrument de mesure du rayonnement total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians ; il sert principalement à la mesure du rayonnement total descendant, somme des rayonnements solaire et atmosphérique dirigés vers le sol.

- Pyranomètre

Instrument destiné à mesurer le rayonnement global G parvenant à une surface plane à partir d'un angle solide 2π stéradians ; lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus D .

- Pyrhéliomètre

Instrument mesurant le rayonnement solaire direct I , l'appareil est orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.

- Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre

Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant et le rayonnement total ascendant (rayonnement solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace).

- Héliographe

Instrument de mesure et d'enregistrement de la durée de l'insolation.

I.6 Estimation de l'irradiation solaire

I.6.1 Irradiation sur un plan horizontal

- Estimation de la composante directe et diffuse de l'irradiation horizontale à partir de l'irradiation globale journalière

L'irradiation globale journalière $G_d(0)$ sur une surface horizontale peut être divisée en une composante diffuse $D_d(0)$ et une composante directe $B_d(0)$.

La distribution du diffus solaire est irrégulière à cause de la variation du climat. Néanmoins, la caractéristique moyenne du diffus est entièrement régulière et peut être en corrélation avec l'indice de clarté de l'atmosphère.

La composante diffuse de l'irradiation horizontale journalière se calcule à partir de la corrélation existante entre la fraction diffuse, K_d et l'indice de clarté de l'atmosphère, K_t . La fraction diffuse K_d est définie par la relation (1.12) suivante :

$$K_d = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \quad (1.12)$$

et l'indice de clarté de l'atmosphère K_t , comme :

$$K_t = \frac{G_d(0)}{G_{ed}(0)} \quad (1.13)$$

Avec :

$G_{ed}(0)$: Irradiation globale extraterrestre journalière

$G_d(0)$: Irradiation globale horizontale journalière

$D_d(0)$: Irradiation diffuse horizontale journalière

Après le calcul de la composante diffuse horizontale, la composante directe de l'irradiation horizontale journalière est déduite de la relation suivante :

$$B_d(0) = G_d(0) - D_d(0) \quad (1.14)$$

- *Modèle de Ruth et Chant :*

La corrélation entre la fraction diffuse K_d et l'indice de clarté de l'atmosphère K_t est donnée par l'expression analytique suivante :

Pour l'intervalle $K_t \leq 0.1$

$$K_d = 0.98 \quad (1.15)$$

Pour l'intervalle $0.1 < K_t \leq 0.7$

$$K_d = 0.910 + 1.154 K_t - 4.936 K_t^2 + 2.848 K_t^3 \quad (1.16)$$

- *Modèle de Collares-Pereira et Rabl*

L'expression analytique de la corrélation est donnée comme suit :

Pour l'intervalle $K_t \leq 0.17$

$$K_d = 0.99 \quad (1.17)$$

Pour l'intervalle $0.17 < K_t < 0.8$

$$K_d = 1.188 - 2.272 K_t + 9.473 K_t^2 - 21.856 K_t^3 + 14.648 K_t^4 \quad (1.18)$$

- *Modèle de Frutos*

La corrélation est donnée par l'équation suivante :

Pour l'intervalle $K_t < 0.166$

$$K_d = 0.9 \quad (1.19)$$

Pour l'intervalle $0.166 \leq K_t \leq 0.8$

$$K_d = 0.77 + 1.93 K_t - 6.86 K_t^2 + 4.27 K_t^3 \quad (1.20)$$

Pour l'intervalle $K_t > 0.8$

$$K_d = 0.109 \quad (1.21)$$

- *Modèle de Macagnan*

La corrélation est donnée comme suit :

Pour l'intervalle $K_t < 0.18$

$$K_d = 0.942 \quad (1.22)$$

Pour l'intervalle $0.18 \leq K_t \leq 0.79$

$$K_d = 0.974 + 0.326 K_t - 3.896 K_t^2 + 2.661 K_t^3 \quad (1.23)$$

Pour l'intervalle $K_t > 0.79$

$$K_d = 0.115 \quad (1.24)$$

- Estimation de la composante directe et diffuse horaire de l'irradiation à partir de l'irradiation globale horaire

La disponibilité de l'irradiation globale horaire horizontale peut être un moyen pour dimensionner ou pour déterminer la performance d'un système photovoltaïque. Cependant, pour la simulation mathématique du fonctionnement d'un système photovoltaïque, les valeurs horaires de la composante diffuse et directe sont nécessaires. En effet, la composante horaire diffuse et directe est indispensable pour calculer l'irradiation globale horaire sur la surface inclinée d'un générateur photovoltaïque. Les modèles présentés ci-dessous utilisent la corrélation qui existe entre l'indice de clarté horaire de l'atmosphère, M_t et la fraction diffuse horaire, M_d . La fraction diffuse horaire M_d est défini par la relation suivante :

$$M_d = \frac{D_h(0)}{G_h(0)} \quad (1.25)$$

Et l'indice de clarté horaire de l'atmosphère M_t , comme :

$$M_t = \frac{G_h(0)}{G_{eh}(0)} \quad (1.26)$$

Avec :

$G_{eh}(0)$: Irradiation globale extraterrestre horaire [Wh/m^2]

$G_h(0)$: Irradiation globale horizontale horaire [Wh/m^2]

$D_h(0)$: Irradiation diffuse horizontale horaire [Wh/m^2]

- *Modèle d'Orgill et Hollands*

La corrélation entre la fraction diffuse horaire M_d et l'indice de clarté horaire de l'atmosphère M_t est donnée par l'expression analytique suivante :

Pour $0 \leq M_t \leq 0.35$

$$M_d = 1.0 - 0.249 M_t \quad (1.27)$$

Pour $0.35 < M_t \leq 0.75$

$$M_d = 1.577 - 1.84 M_t \quad (1.28)$$

Pour $M_t > 0.75$

$$M_d = 0.177 \quad (1.29)$$

- *Modèle de Erbs-Klein et Duffie*

Pour Erbs-Klein et al. la corrélation est donnée pour trois intervalles de l'indice de clarté horaire de l'atmosphère M_t comme suit :

Pour $0 \leq M_t \leq 0.22$

$$M_d = 1.0 - 0.09 M_t \quad (1.30)$$

Pour $0.22 < M_t \leq 0.80$

$$M_d = 0.9511 - 0.1604 M_t + 4.388 M_t^2 - 16.638 M_t^3 + 12.336 M_t^4 \quad (1.31)$$

Pour $M_t > 0.80$

$$M_d = 0.165 \quad (1.32)$$

- *Modèle de Spencer :*

Spencer prend en compte la latitude du lieu ϕ comme paramètre. Le modèle proposé par Spencer est illustré par la corrélation suivante :

Pour $0.35 \leq M_t \leq 0.75$

$$M_d = a - b M_t \quad (1.33)$$

Avec :

$$a = 0.940 + 0.0118 / \phi /$$

$$b = 1.185 + 0.0135 / \phi /$$

1.6.2 Estimation de l'éclairement horaire sur une surface inclinée

Pour le calcul et les équations ci-dessous, il est supposé que l'irradiation solaire durant une heure coïncide numériquement avec l'éclairement solaire au milieu cette heure.

L'éclairement global incident sur une surface inclinée se compose en trois composantes qui sont les suivantes :

- L'éclairement direct
- L'éclairement diffus
- L'éclairement réfléchi par le sol.

Alors et pour une inclinaison d'un angle β , l'éclairement globale $G(\beta)$ est donné par la somme de l'éclairement directe $B(\beta)$, l'éclairement diffuse $D(\beta)$ et l'éclairement réfléchi $R(\beta)$:

$$G(\beta) = B(\beta) + D(\beta) + R(\beta) \quad (1.34)$$

- Eclairement direct

La composante directe $B(\beta)$ peut être obtenue en utilisant l'angle de l'incidence θ_s et l'angle zénithal θ_{zs} comme suit :

$$B(\beta) = B_h(0) \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} \quad (1.35)$$

- *Eclairement diffus*

- *Modèle de Liu et Jordan*

Le modèle considère uniforme (isotrope) l'intensité de l'éclairement diffus provenant de la voûte céleste. L'éclairement diffus sur un plan incliné est donné par la relation (1.36) :

$$D(\beta) = D_h(0) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (1.36)$$

- *Modèle de Willmott*

Willmott considère isotrope la composante diffuse provenant directement du disque solaire de même pour l'irradiation provenant du reste de la voûte céleste. La relation du modèle proposé est la suivante :

$$D(\beta) = D_h(0) \left[F(0) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + (1 - F(0)) \frac{\cos \theta(0)}{\sin(\alpha(0))} \right] \quad (1.37)$$

$$F(0) = 1 - \left[1 - \frac{D_h(0)}{G_h(0)} \right] \frac{G_h(0)}{G_{oh}(0)} \quad (1.38)$$

Avec :

$\alpha(0)$: Hauteur du soleil au milieu de l'heure.

- *Eclairement réfléchi*

L'éclairement réfléchi sur une surface inclinée est donné par la relation suivante :

$$R(\beta) = \rho \frac{G_h(0)(1 - \cos \beta)}{2} \quad (1.39)$$

Avec :

$G_h(0)$: Eclairement Global horaire

β : inclinaison du module PV

ρ : Albédo du lieu

1.7 Irradiation global extraterrestre G_0

L'irradiation globale extraterrestre est donnée par la formule (1.40) :

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \cdot \sin h_s \quad (1.40)$$

Avec :

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$$

$$\varepsilon = 1 + 0.0334 \cdot \cos\left(dy \cdot \frac{2\pi}{365.25} - 0.048869\right)$$

Où : ε est la correction de la distance solaire à l'instant t de l'année.

dy : jour de l'année

h_s : angle d'altitude solaire

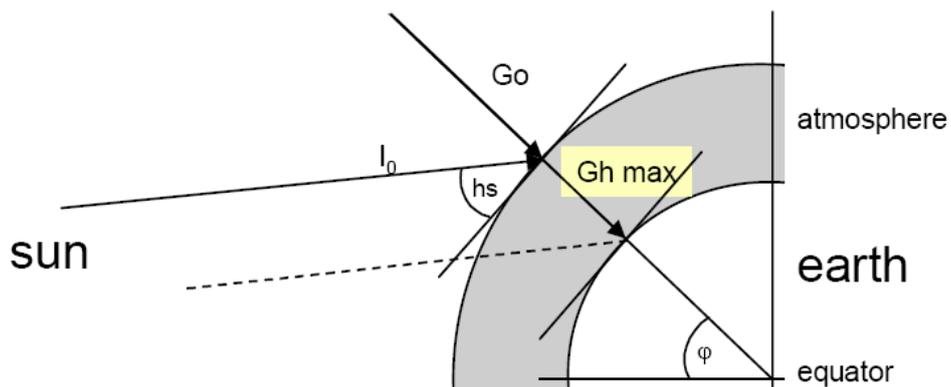


Fig.1.14: Irradiation global extraterrestre. [5]

1.8 Modèles de la température ambiante et de jonction

1.8.1 Modèle de la température ambiante

Le modèle calcule le profil journalier de la température ambiante en se basant sur la disponibilité des valeurs horaires mesurées de T_{max} et de T_{min} .

Pour l'intervalle $-\pi < \omega < \omega_s$

$$T_a = T_{max}(j-1) \frac{T_{max}(j-1) - T_{min}(j-1)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (1.41)$$

Pour l'intervalle $\omega_s < \omega < \pi/6$

$$T_a = T_{min}(j) \frac{T_{max}(j) - T_{min}(j)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (1.42)$$

Avec:
$$a = \frac{\pi}{\left(\omega_s - \frac{\pi}{6}\right)} \quad \text{et} \quad b = -a \frac{\pi}{6}$$

Pour l'intervalle $\pi/6 < \omega < \pi$

$$T_a = T_{max}(j) \frac{T_{max}(j) - T_{min}(j+1)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (1.43)$$

Avec :

$$a = \frac{\pi}{\left(2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6}\right)} \quad \text{et} \quad b = -\left(\pi + \frac{a\pi}{6}\right)$$

1.8.2 Modèle de la température de jonction

Pour les modules normalement ventilés, la température de la cellule est déterminée à l'aide d'un modèle utilisant le NOCT (Normal Operating Cell Temperature)

$$T_j = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G(\beta) \quad (1.44)$$

Avec :

T_a et T_j : Températures ambiante et de jonction [°C]

$G(\beta)$: Eclairement solaire incident sur le plan du module [W/m²]

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'irradiation solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, la composition du rayonnement solaire, et enfin les différents modèles qui permettent d'estimer les composantes de l'irradiation solaire et de la température.

L'intérêt d'une exploitation rigoureuse du gisement solaire réside dans l'orientation précise de n'importe quel capteur sur terre.

2.1 Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques, connaît depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40 % par an. [18]

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et de développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ce chapitre s'intéresse à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau. D'abord, le principe de fonctionnement de ces derniers et les systèmes PV pour habitat seront évoqués. Puis, les principaux composants d'un système PV connecté au réseau seront détaillés. Ensuite, l'étude des principaux systèmes photovoltaïques connectés au réseau montrera la présence de deux classes de systèmes : les systèmes à connexion directe et les systèmes à bus continu intermédiaire. Ces systèmes fonctionnent avec un ou plusieurs convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs permettent la connexion au réseau et d'extraire le maximum de puissance des panneaux photovoltaïques grâce à l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Enfin, l'énergie photovoltaïque produite par le générateur PV sera injectée totalement ou seulement le surplus sur le réseau.

2.2 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque

Une installation photovoltaïque se compose de modules solaires, eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques, à base de silicium le plus souvent.

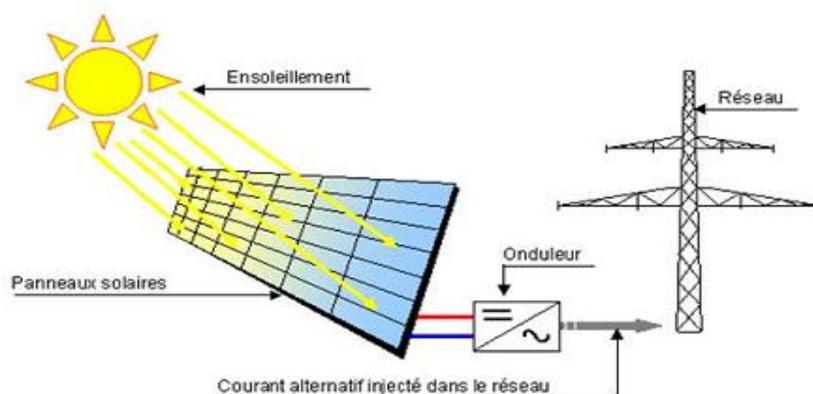


Fig.2.1 : Système PV raccordé au réseau. [30]

Ces générateurs transforment directement l'énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance est exprimée en Watt- crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans les conditions d'ensoleillement optimales.

Un ou plusieurs onduleurs convertissent le courant continu produit en courant alternatif à 50Hz et 220 V. Selon le choix retenu, toute ou une partie de la production est injectée sur le réseau public, et le reste est consommé par le producteur. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire, voir figure 2.1.

2.3 Systèmes photovoltaïques pour l'habitat

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée. [2]

2.3.1 Isolé

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la figure 2.2 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé au générateur PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

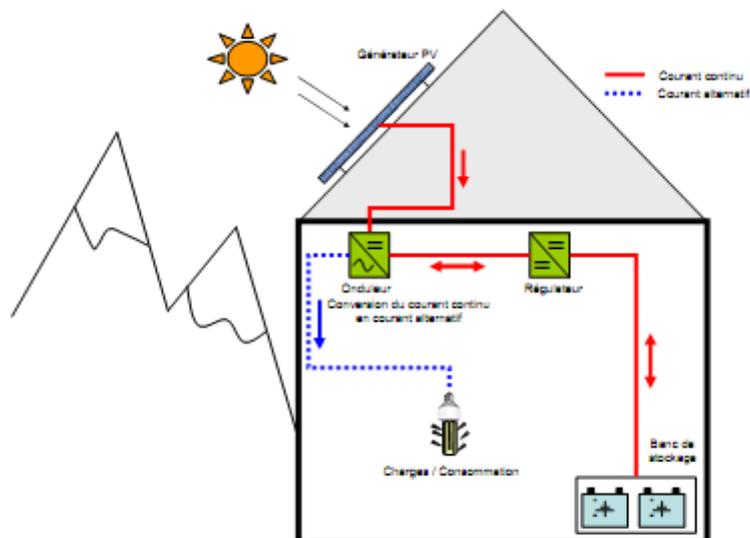


Fig.2.2 : structure d'un système PV autonome. [4]

2.3.2 Connecté au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement, voir Figure 2.3.

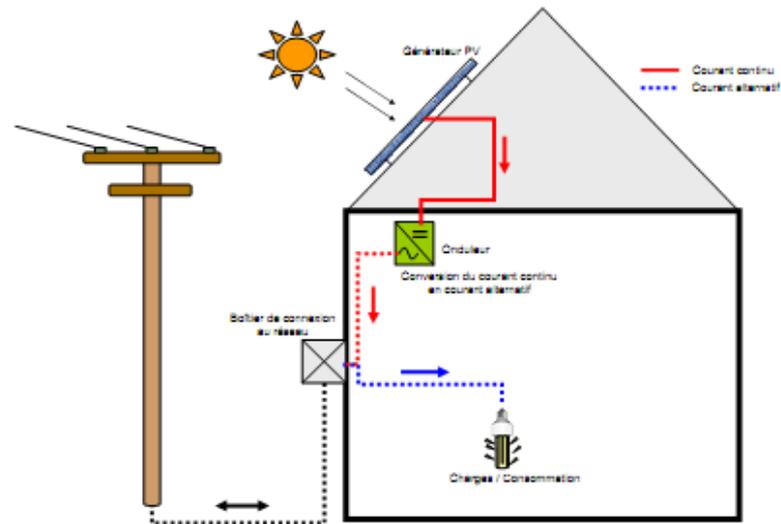


Fig.2. 3 : structure d'un système PV connecté au réseau. [4]

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il ya un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ».

Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée.

- Avantages

Par rapport à un système autonome, on gagne sur les points suivants :

- Exploitation de la totalité de l'énergie photovoltaïque issue des panneaux (le stockage est « infini »).
- Economie de l'ordre de 40 % sur les investissements (les batteries en moins).
- Maintenance quasi inexistante (ce sont les batteries qui demandent le plus d'attention).
- Meilleure durée de vie du système.

Cette solution est plus rentable que l'alimentation photovoltaïque purement indépendante, mais malheureusement encore très onéreuse en comparaison d'une alimentation électrique à 100% sur réseau.

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation est injecté sur le réseau.

- Inconvénients

Les installations photovoltaïques couplées au réseau ont cependant deux inconvénients majeurs :

- L'intermittence de la production d'énergie solaire ne permet pas le contrôle des périodes d'injections.
- Le déphasage entre la consommation et la production réduit la notion d'autonomie énergétique personnelle.

2.4 Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Un système photovoltaïque (PV) connecté au réseau est composé dans son ensemble d'un :

- Générateur photovoltaïque,
- Convertisseur (DC/AC) permettant d'alimenter les charges alternatives,

2.4.1 Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs. [3]

- Principe photovoltaïque

- Jonction P-N

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneur d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trou). L'interface entre ces deux régions s'appelle jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires. [3]

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel (V_D) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (2.1)$$

Avec :

V_D : Tension de diffusion sur une jonction [V].

N_D : Concentration des donneurs [cm^{-3}]

N_A : Concentration des trous [cm^{-3}]

k : $1.380662 \cdot 10^{-23}$ C. constante de Boltzmann.

q : $1,602 \cdot 10^{-19}$ C. charge élémentaire.

T : température absolue du cristal [K].

n_i : Concentration intrinsèque.

$V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$ à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

- Production d'électricité

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultante de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

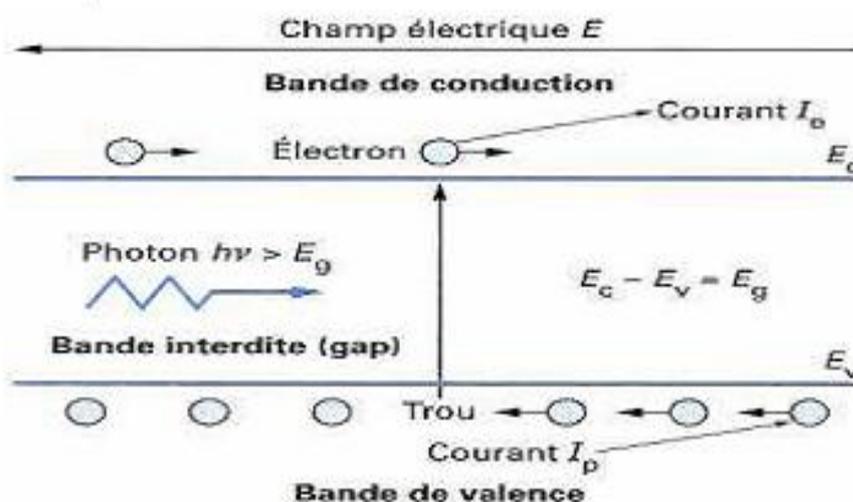


Fig.2.4 : Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie. [3]

- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R.

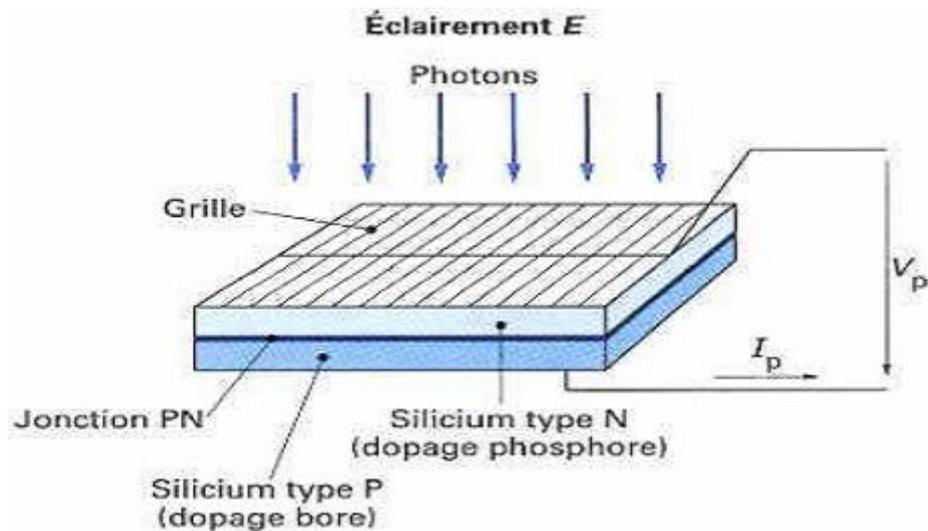


Fig.2.5: Production d'électricité par la séparation électron-trou. [3]

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occuper qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant.

- Paramètres de cellules photovoltaïques

Les principaux paramètres des cellules photovoltaïques sont :

- La caractéristique I-V

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure 2.6.

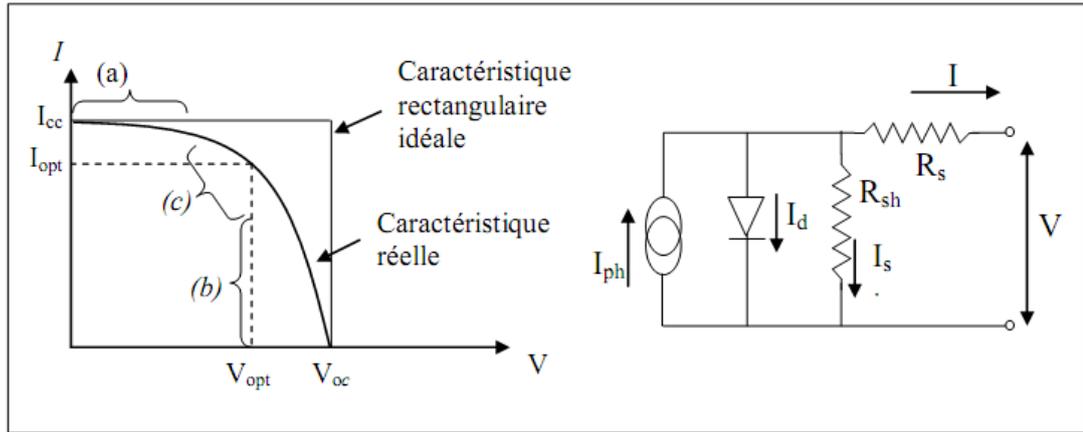


Fig.2.6 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [2]

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
 - La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} ,
 - La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [6]
- Tension à circuit ouvert, V_{oc}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.[2]

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.2)$$

- Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

- Point de fonctionnement optimum, (V_m , I_m)

Lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »

$$P_m = V_m \times I_m \quad (2.3)$$

- Rendement de conversion

Le rendement η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.4)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm² [6]

La densité de la puissance incidente égale à P_{in}/A .

A : Section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant-circuit et la tension à circuit ouvert.

- Facteur de forme, ff

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale P_m et puissance maximale que peut avoir la cellule ; il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (2.5)$$

- Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules.

- Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. [24]

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15% et jusqu'à 24% en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

- Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. [24]

Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20 % en labo.

- Cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [24]

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement 6 % seulement par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie de nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium(GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre(CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38% au laboratoire.

- Association des cellules photovoltaïques

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m²; 25°C ; AM 1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2,3 Wc sous une tension de 0,5 V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur photovoltaïque de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plus part des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et /ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. [19]

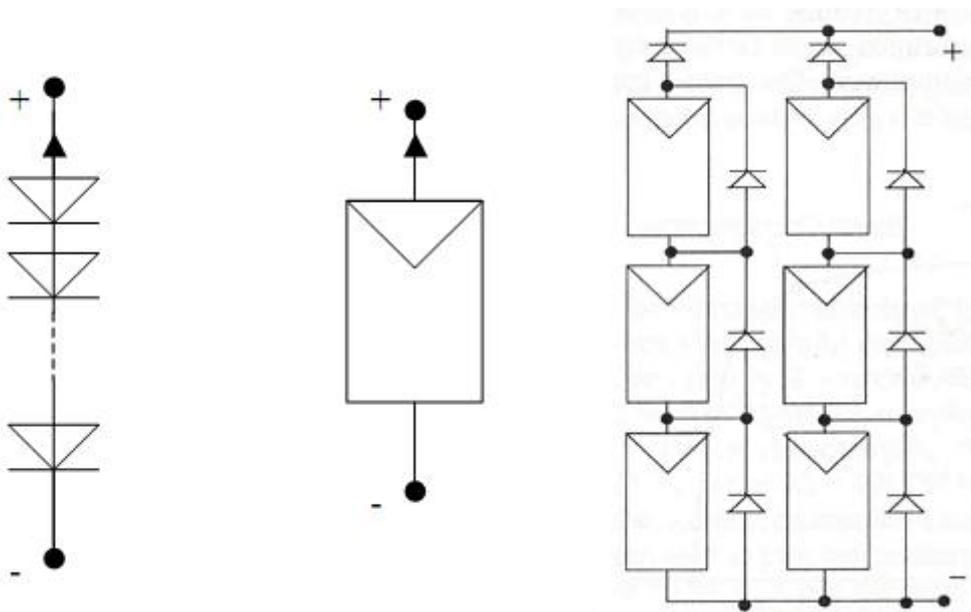


Fig.2.7: Cellule, module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass). [2]

- Association en série

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure 2.8. L'équation (2.6) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

$$Voc_{n_s} = n_s * Vco \quad \text{et} \quad Icc = Icc_{n_s} \quad (2.6)$$

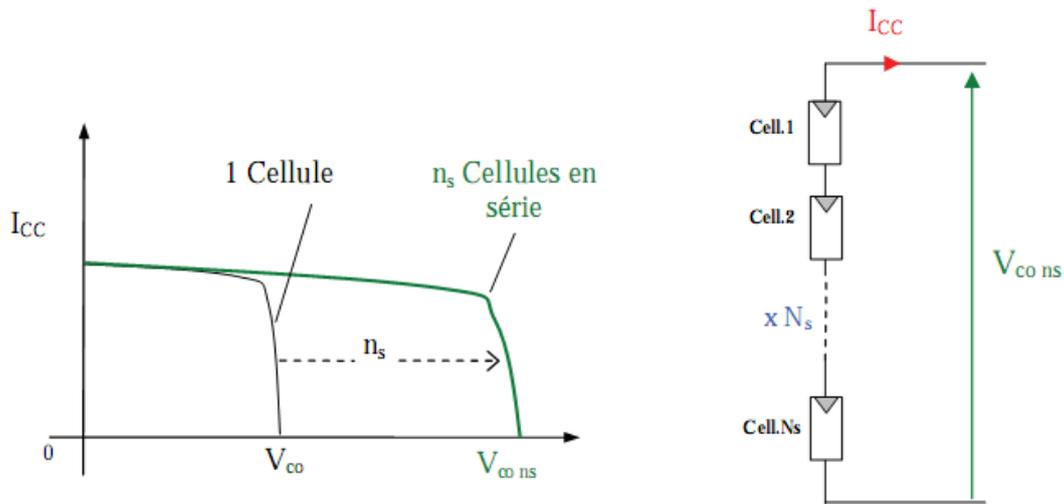


Fig.2.8: Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série. [19]

Les expressions de la tension (T_{mod}) et du courant (I_{mod}) du module sont :

$$V_{mod} = \sum V_{cel} \quad (2.7)$$

$$I_{mod} = \sum I_{cel} \quad (2.8)$$

Où : V_{cel} et I_{cel} sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

- Association en parallèle

Une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure (2.9). L'équation (2.9) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules.

$$\text{Avec : } I_{sc_{np}} = n_p * I_{sc} \text{ et } V_{oc_{np}} = V_{oc} \quad (2.9)$$

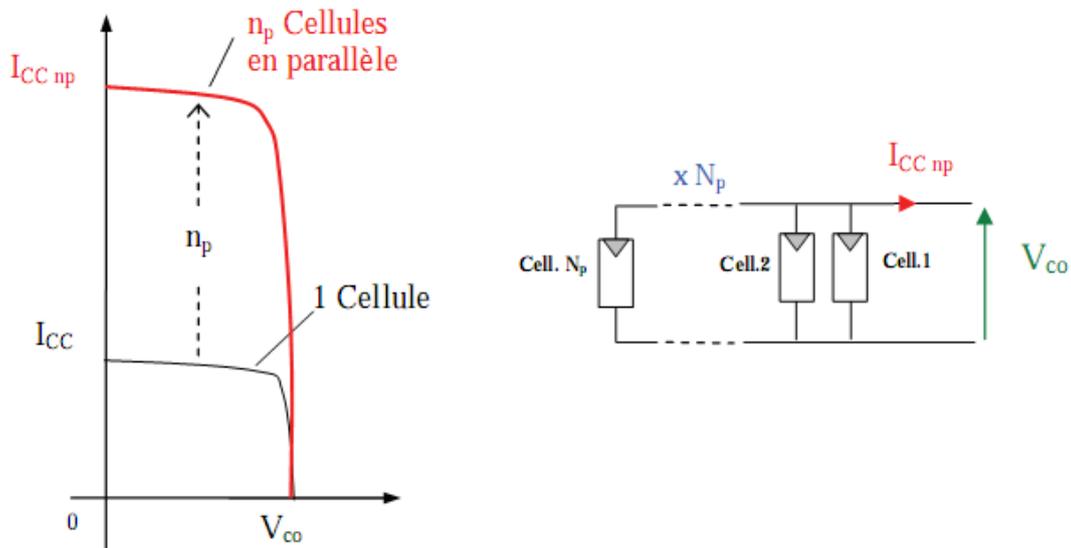


Fig.2.9: caractéristique résultante d'un groupement en parallèle n_p cellules identiques. [19]

- **Association hybride (série-parallèle) :**

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, voir figure 2.10, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont donnés par les relations (2.10) et (2.11) : [1]

$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \quad (2.10)$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc} \quad (2.11)$$

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, en une série pour éviter les courants inverses et en parallèle, dit diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de protection associée.

La diode by-pass, lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indique la figure (2.11b), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un

panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection. [19]

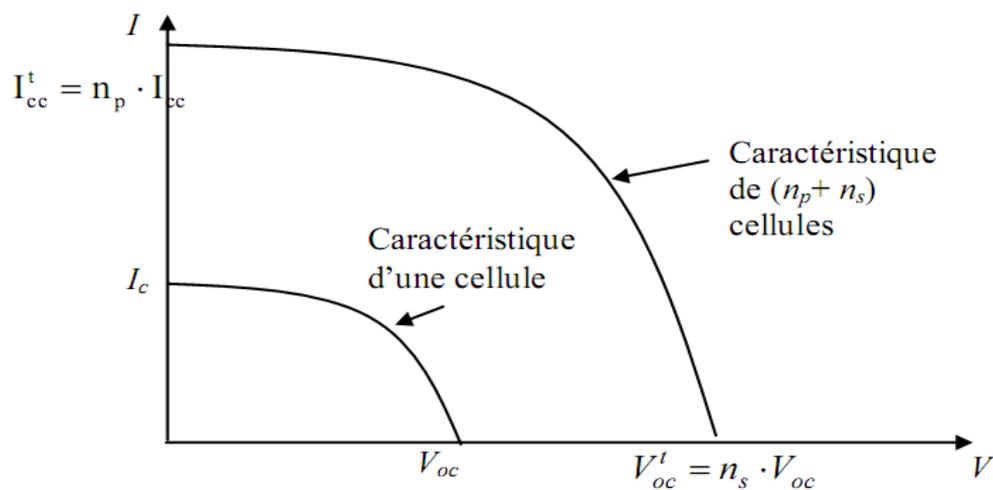


Fig.2.10: caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques [6]

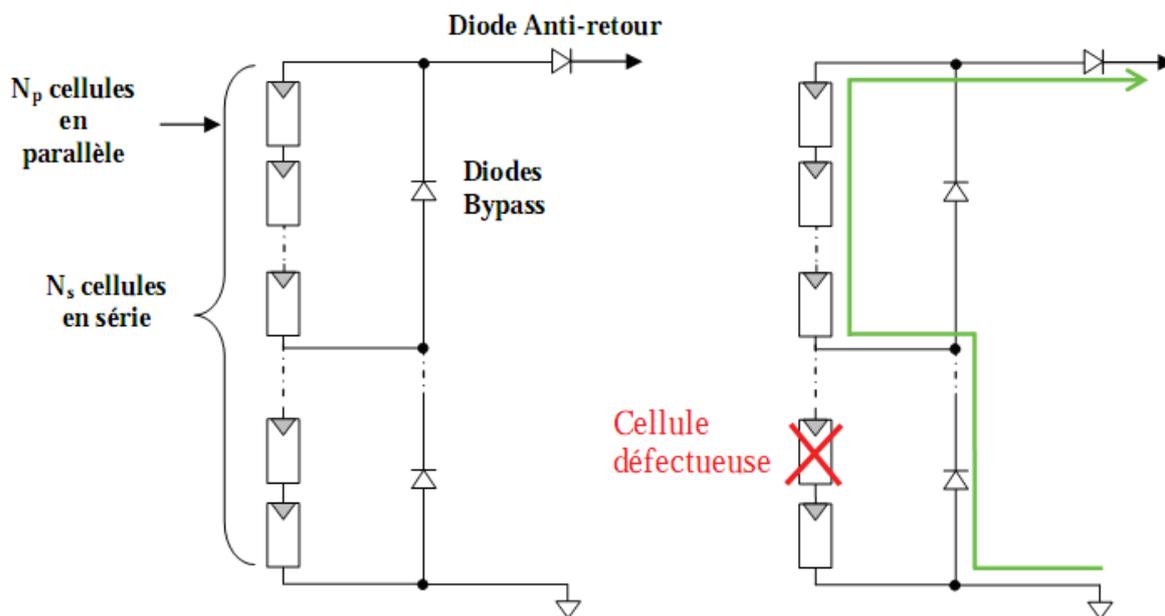


Fig.2.11 : a)- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b)- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation I_{PV} [19].

2.4.2 Convertisseur

- Définition

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative. [7]

- Convertisseurs continu/continu (DC/DC)

Ce type de composant est utilisé pour transformer la tension des batteries en une tension DC différente pour alimenter un appareil spécial comme par exemple un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable...

Deux types de convertisseurs DC/DC sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension.

- Convertisseurs vers le haut (élevateur de tension)

La figure 2.12 présente les composants typiques d'un convertisseur vers le haut.

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie ; lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption du courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et le récepteur ; la diode empêche tout retour de courant.

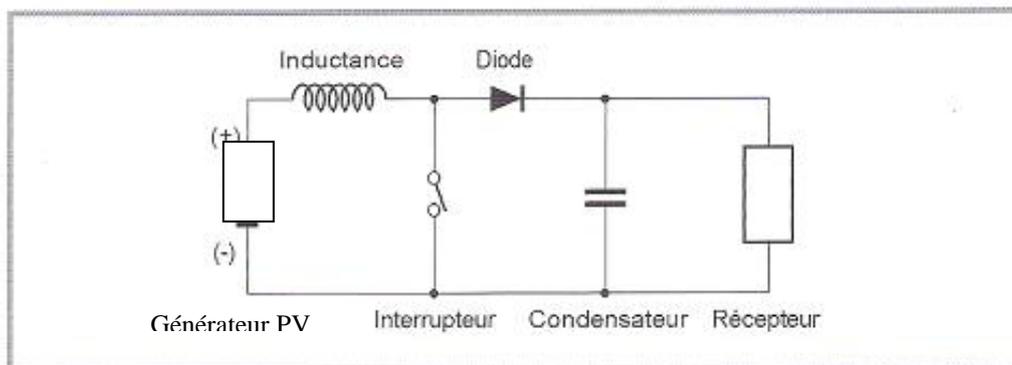


Fig.2.12 : exemple de convertisseur DC/DC vers le haut [7]

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie et l'interrupteur est commandé par une électronique de contrôle qui mesure en permanence la tension et le courant de sortie pour ajuster la fréquence et la largeur de commande de l'interrupteur et limite le courant à une valeur sûre pour les composants. Le rendement typique dépasse en général 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs. [7]

- Convertisseurs vers le bas (abaisseur de tension)

La figure 2.13 présente les composants typiques d'un convertisseur vers le bas.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule de la batterie vers le récepteur à travers l'inductance et lorsque l'interrupteur s'ouvre, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse, ce qui fait conduire la diode qui protège l'interrupteur. L'électronique de contrôle commande la fréquence et la durée de fonctionnement de l'interrupteur en fonction de la tension désirée et du courant maximal possible. Le rendement typique est ici légèrement supérieur au modèle précédent et en générale de 80 à 90 % pour les appareils modernes. [7]

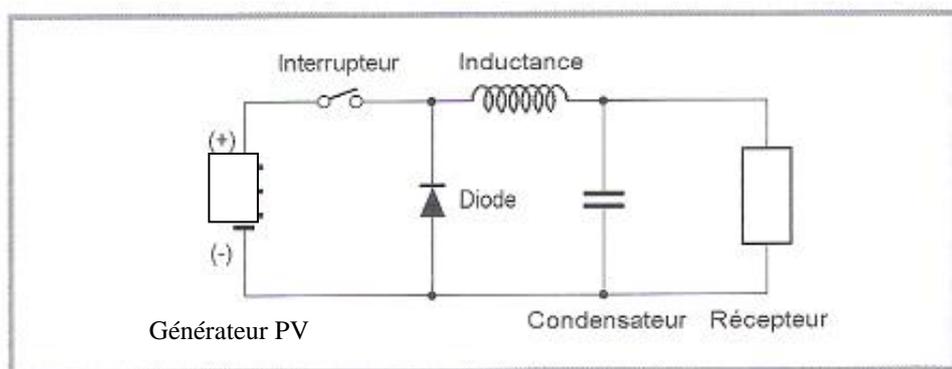


Fig.2.13: convertisseur typique DC/DC vers le bas. [7]

- Onduleurs DC/AC

- Principe de fonctionnement

Un onduleur est un convertisseur de tension continue /alternative. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique photovoltaïque en énergie électrique alternative soit pour faire fonctionner

des charges, soit pour débiter de l'énergie au réseau. Généralement à base de thyristors, selon l'exploitation de cet onduleur peut être monophasé ou triphasé. [18]

La figure présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM ; l'onduleur (monophasé ou triphasé) de tension impose à sa sortie un système de tension sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsion (MLI, ou PWM en anglais). Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance L_d située avant le transformateur afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

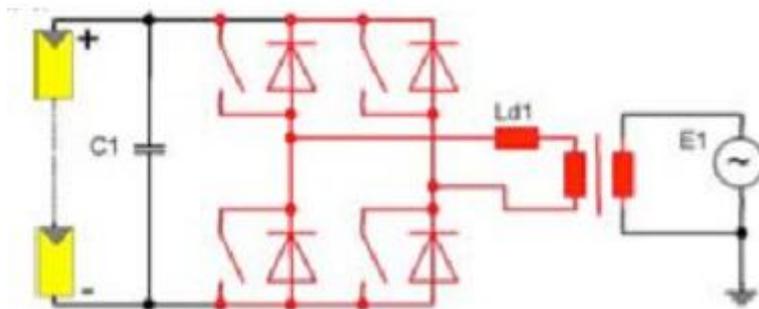


Fig.2.14 : Circuit simple utilisant un pont de transistors [18]

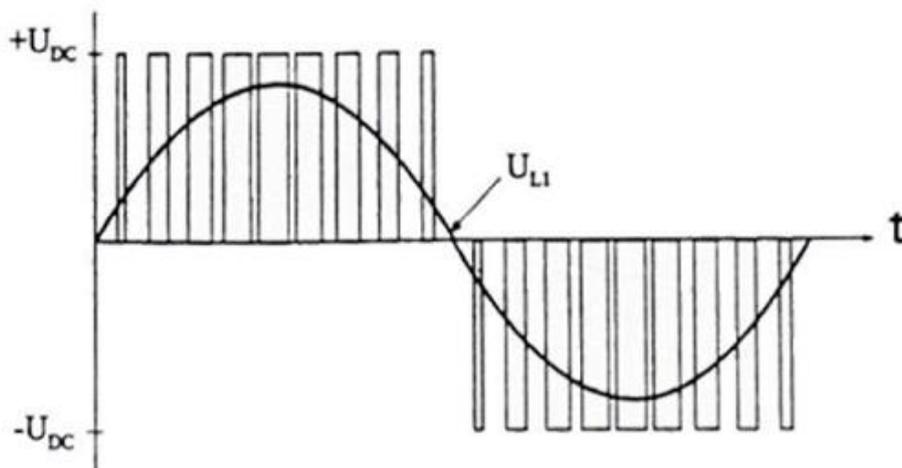


Fig.2.15: Filtrage de la tension par l'inductance de sortie [18].

- Critères de choix des onduleurs

Historiquement, les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou encore une onde dite pseudo- sinusoïdale. Le choix de l'onduleur va dépendre des appareils qu'il devra faire fonctionner, ce choix s'appuyant sur des critères valables pour n'importe qu'elle onde.

- Précision de la tension de sortie

Ce chiffre est donné en pourcentage par rapport à 230 VAC. Utile dans certaines utilisations si l'on alimente des appareils électroniques délicats. L'onduleur doit être stable quelle que soit sa charge et quelle que soit sa tension d'entrée.

- Résistance aux surcharges et au courant réactif

Pour arriver à démarrer certaines charges, l'onduleur doit produire souvent plusieurs fois sa puissance maximale pendant un temps assez bref.

- Distorsion harmonique

Dans certaines utilisations sensibles, la présence d'harmoniques est une gêne audible (hi-fi) ou elle perturbe le fonctionnement de la charge (moteurs). Les onduleurs non sinusoïdaux perturbent non seulement l'environnement électromagnétique mais les harmoniques sont également une perte d'énergie dans le cas de l'alimentation de moteurs par exemple.

- Rendement

C'est sans conteste le critère de choix principal. On désire perdre le moins d'énergie possible entre les batteries et la charge en 230 VAC.

On s'intéresse à la courbe de rendement en fonction de la charge d l'onduleur ; les appareils modernes performants atteignent un rendement supérieur à 90 % dès que la charge est de 5 à 10% de leur puissance nominale.

➤ Consommation en mode d'attente

C'est une donnée très importante pour les onduleurs qui travaillent occasionnellement et restent branchés en permanence. Souvent dans ces cas l'énergie utilisée par la consommation à vide est plus importante que celle utilisée par les récepteurs. Pour économiser l'énergie, les appareils modernes utilisent des techniques de détection d'utilisateur pour démarrer toute la puissance dès qu'un récepteur est branché sur le réseau.

➤ Tension d'entrée

Dans le cas d'un système autonome, la tension d'entrée correspond à la tension du système mis en place. On peut aussi pour choisir cette tension utiliser la méthode suivante, en fonction de la demande en électricité (D):

- si $D < 2$ kW alors $U_e = 12$ VCC
- si D compris entre 2 et 5 kW alors $U_e = 24$ ou 48 VCC
- si $D > 5$ kW alors $U_e = 48$ VCC et plus

Dans le cas d'un système connecté au réseau, la tension CC d'entrée doit être plus élevée (Par exemple 120 VCC et plus), en respectant la mise en série des modules PV. [29]

- Onduleurs pour couplage au réseau

Les applications photovoltaïques les plus valorisantes actuellement sont les installations PV destinées à alimenter le réseau électrique public.

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximale. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du

réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings (chaînes) et les onduleurs intégrés aux panneaux (module).

- Onduleur central

Dans le cas d'onduleur, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne, elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, figure 2.16. Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'intercepteurs de puissance.

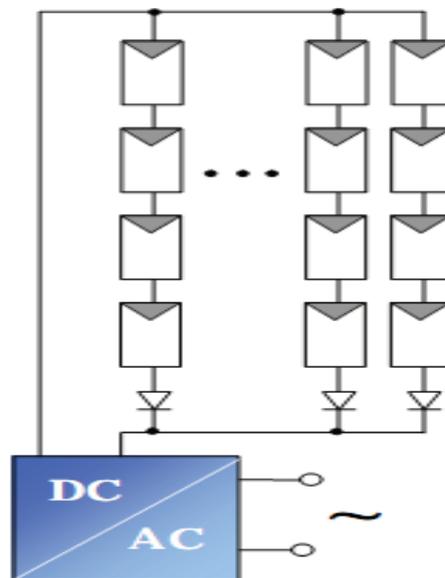


Fig.2.16: Typologie des systèmes Onduleur Centralisé [18].

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique imbattable

(entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède le plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son point de puissance maximum. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène. Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant que qu'il ne le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsque qu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

- Onduleur chaîne

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de string (chaîne). Chaque string est toutefois relié à un onduleur, figure 2.17.

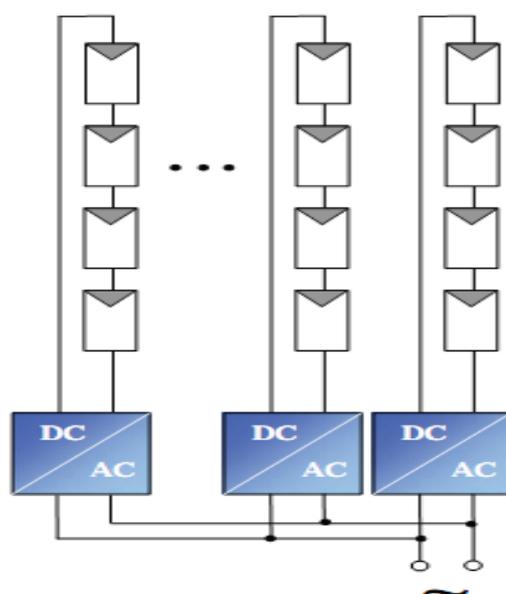


Fig.2.17: Typologie des systèmes Onduleur Chaîne [18]

Chaque string peut ainsi fonctionner à son point de puissance maximale. Cette technologie réduit considérablement le risque de problème d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en considération l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaire pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente.

- Onduleur module

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (figure 2.18), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre le GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

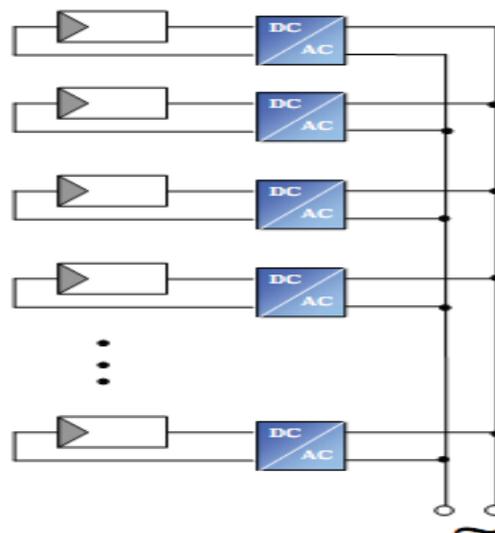


Fig.2.18 : Typologie des systèmes Onduleur Module AC.[18]

Habituellement, les onduleurs strings et intégrés sont reconnus pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. D'autre part, l'onduleur central est souvent moins cher en termes d'équipement électronique qui est, somme toute, très modeste, il dispose d'un meilleur rendement et est, en plus, plus fiable, tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques techniques des différents systèmes de configuration. [18]

	Onduleur Central	Onduleur String	Onduleur Intégré
Tension PV	340-800V	150-800V	17-90V
Pertes DC (Ohmique)	~1-5% en fonction de la tension et de la distance	~1% en fonction de la tension et de la distance	Négligeable
η_{CONV}	95-97%	92-96%	87-93%
Maintenance et réparation	Simple	Difficile (recherche dysfonctionnement)	Difficile (recherche dysfonctionnement)

2. 5 Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque. [11]

- ✓ Les systèmes à connexion direct au réseau. Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.
- ✓ Le système à bus continu intermédiaire. Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un bus continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD). On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

2.5.1 Système PV connecté directement au réseau

La structure présentée à la figure 2.19 est le plus simple, car il comporte le moins de composants possible.

Dans ce cas, on associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternatif à un hacheur élévateur de tension. Un onduleur (convertisseur continu /alternatif) photovoltaïque classique est placé en sortie des modules. Son rôle est de faire fonctionner les modules à leurs points de puissance maximum et de convertir le courant continu photovoltaïque en courant alternatif synchronisé avec le réseau. L'énergie produite par les modules photovoltaïques doit pouvoir alimenter les charges, le surplus est injecter sur le réseau.

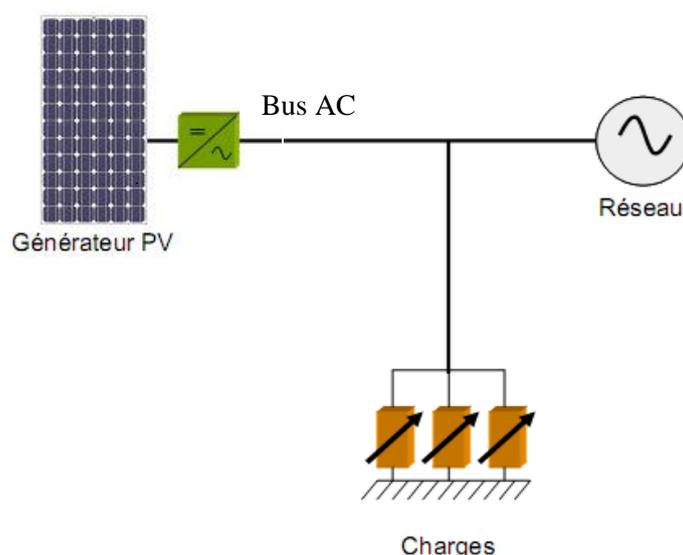


Fig.2.19 : Architecture du système PV avec un bus en courant alternatif (AC). [4]

Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système PV du réseau. L'inconvénient majeur de cette architecture est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus le contrôle du point de fonctionnement maximum est approximatif car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement.

2.5.2 Systèmes à bus continu intermédiaire

Dans ce cas, le système comporte deux éléments de conversion Figure 2.20. Un convertisseur continu/continu (hacheur) placé en sortie des modules photovoltaïques qui contrôle le point de fonctionnement maximum du générateur photovoltaïque et élève sa tension de sortie délivrée

sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 ou 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur central pour avoir une sortie sinusoïdale.

L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

Les inconvénients majeurs de ce type de montage sont :

- ✓ La capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module,
- ✓ La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien.

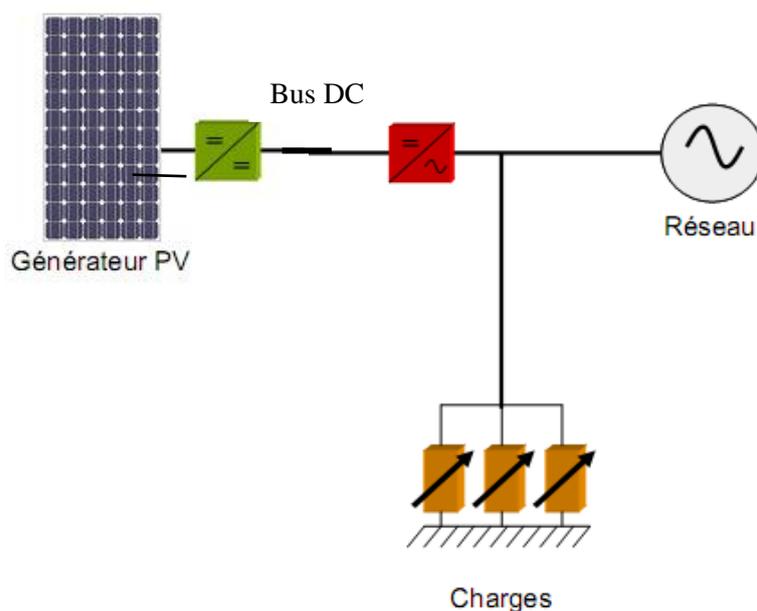


Fig.2.20: Architecture du système PV avec un bus en courant continu (DC)[4]

2.6 Options de raccordement

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution.

2.6.1 Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

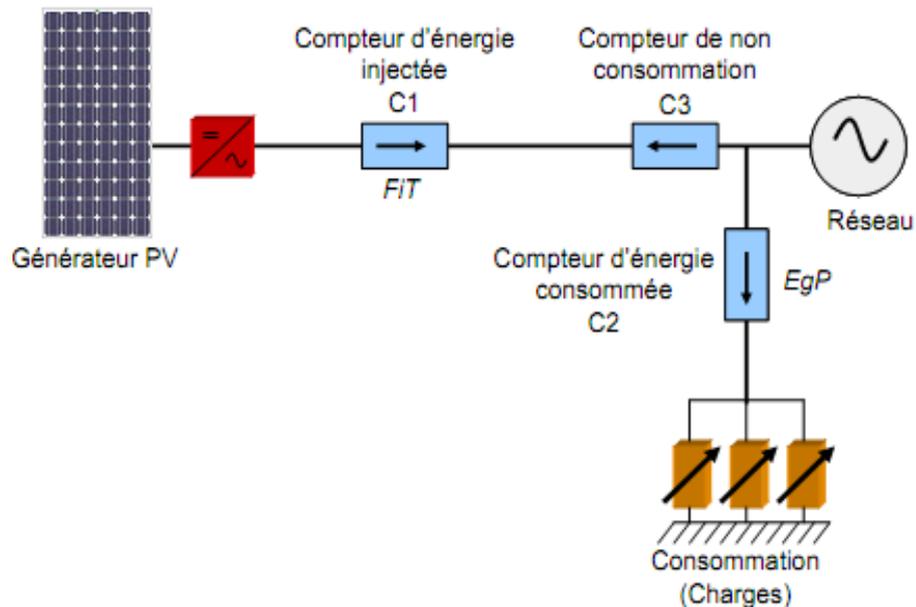


Fig.2.21: Injection de la totalité de production sur le réseau. [4]

Le compteur C3 permet de vérifier qu'il n'y pas de consommation d'énergie par le système PV pour éviter les fraudes par l'ajout d'un élément de stockage. En effet, sans ce compteur il serait possible de mettre un élément de stockage que l'on chargerait au prix « EgP » et que l'on chargerait sur le réseau au tarif « FiT ». Le compteur C3 doit donc toujours être égal à zéro.

Avec :

« FiT » : le tarif d'achat d'énergie PV. (Feed in Tarif)

« EgP » : le prix de vente de l'électricité sur le réseau (Electricity grid Price).

2.6.2 Injection du surplus de production

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

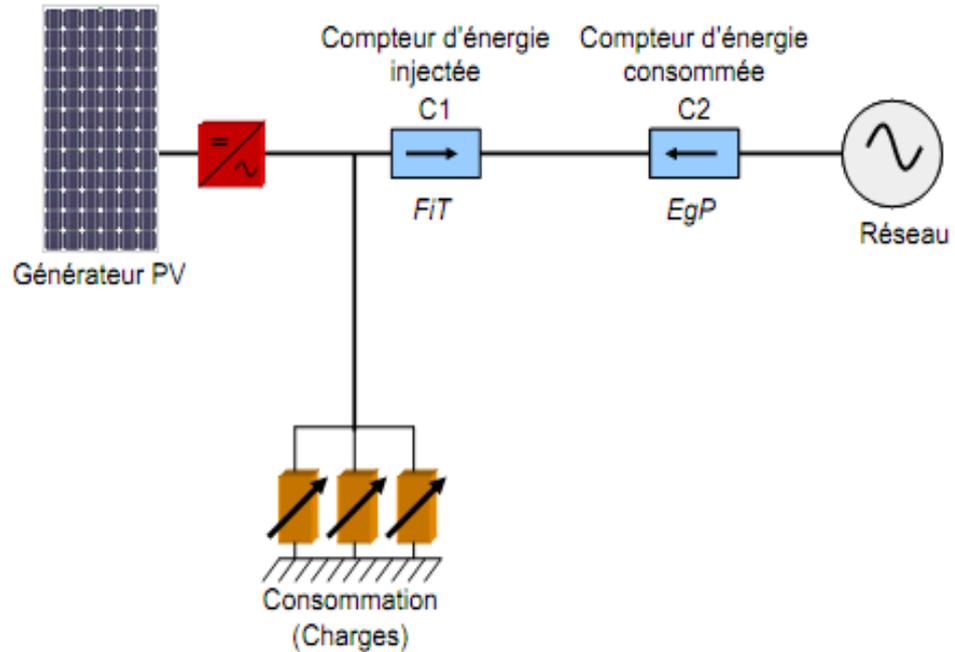


Fig.2.22: Injection du surplus de production sur le réseau.[4]

2.7 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les principales composantes d'un générateur photovoltaïque couplé au réseau à prendre en compte pour son étude et sa modélisation. L'étude bibliographique de ces générateurs a permis de les classer en deux catégories : les structures à connexion directe et les structures à bus continu intermédiaire.

3.1 Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt par une production dépassant 1800 MW à travers le monde. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. [17]

Après avoir présenté et citer les différents composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système. Dans ce chapitre, nous nous proposons de le modéliser puis simuler ses composants à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab. Dans un premier temps, nous décrivons les différents modèles électriques équivalents d'un générateur PV rencontrés ans la littérature. Ensuite, nous passerons à l'étude des différents modèles de convertisseurs. Une fois ces étapes franchies, nous procédons à leurs modélisations en vue de les intégrer au système PV connecté au réseau.

3.2 Présentation du système proposé pour l'étude

Notre étude porte sur un système composé d'un générateur photovoltaïque (source), de charges locales considérées comme un profil de consommation (charge) et du réseau électrique (source ou charge).

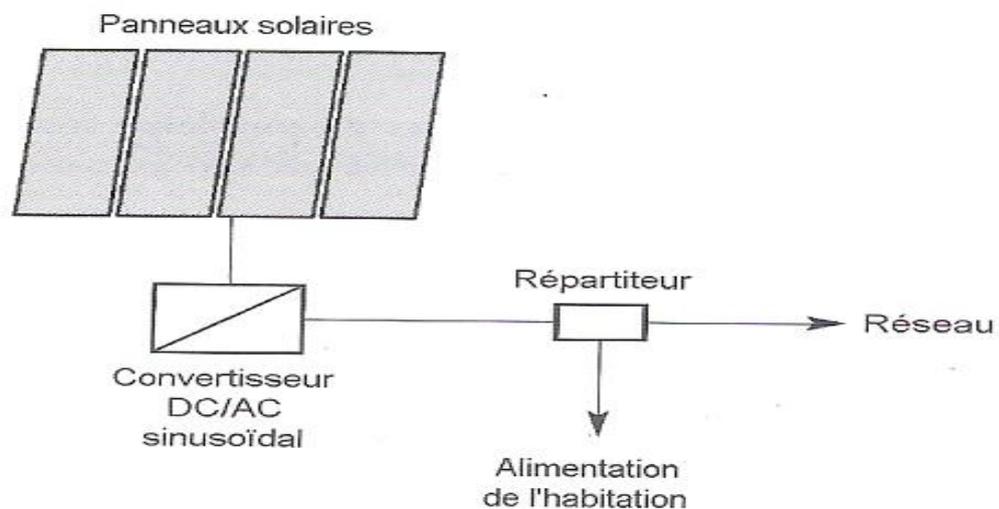


Fig.3.1 : Système PV raccordé au réseau. [1]

Dans le cas d'un système PV connecté au réseau, l'architecture électrique du système est représentée sur la figure 3.1.

Le système comporte un élément de conversion. Un onduleur central (convertisseur continu/alternatif) photovoltaïque est placé en sortie des modules. Son rôle est de faire fonctionner les modules à leurs points maximum et de convertir le courant continu photovoltaïque en courant alternatif synchronisé avec le réseau.

3.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus en moins de détails.

Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et la température de la cellule.

3.3.1 Générateur photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'air de transition p-n de la cellule PV (Figure 3.2). Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_D , dans la diode.

Nous avons alors la relation (3.1) :[3]

$$I = I_{ph} - I_D \quad (3.1)$$

Pour un générateur idéal, la tension aux bornes da la résistance égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_D$

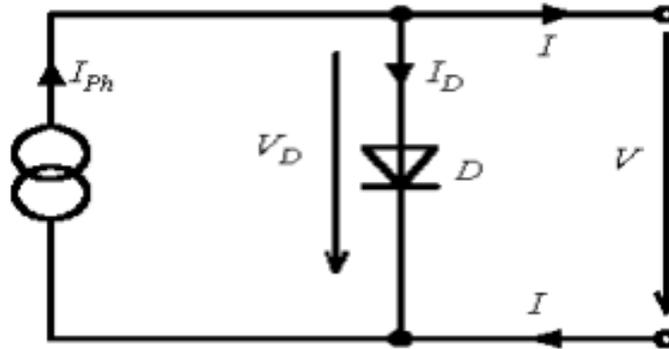


Fig.3.2 : modèle simple d'une cellule PV. [3]

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donné par la relation :

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

Avec :

I_S : courant de saturation inverse de la diode,

$V_T = kT/q$, potentiel thermique,

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles.

3.3.2 Générateur photovoltaïque réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_S et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} , comme montre la Figure 3.3. [17].

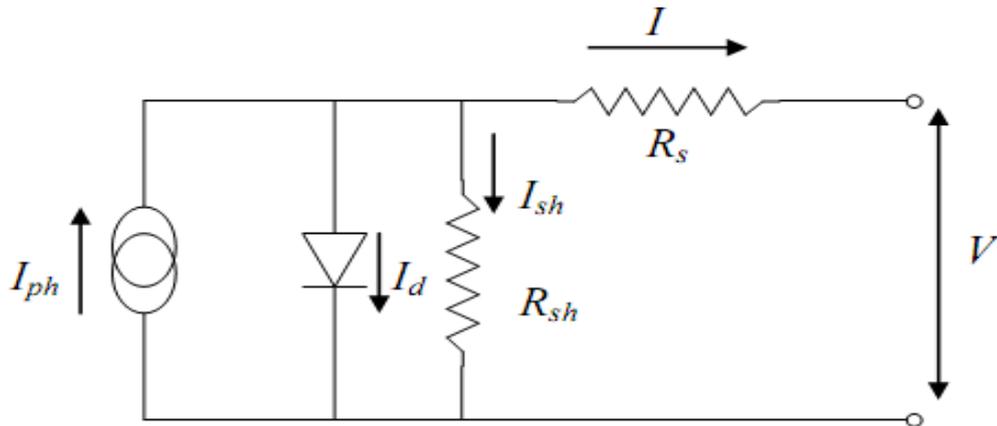


Fig.3.3 : Modèle de la cellule PV à une diode. [17]

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{A K T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

Avec :

I : Intensité aux bornes du générateur [A]

I_s : Le courant de saturation de la diode [A]

V : Tension aux bornes du capteur [V]

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiation G , avec correction selon T .

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt(ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

k : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

A : le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.

T_j : Température de jonction.

Nous obtenons une équation implicite en I et V qui peut être résolue grâce à une méthode numérique.

3.3.3 Modèles de la caractéristique I-V

Il existe différents modèles de la caractéristique courant – tension.

- Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus cité dans la littérature. Il est défini par le même schéma électrique équivalent de la figure 3.3 qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, une résistance Shunt (R_{sh}) qui représente l'état de la surface à la périphérie de la cellule, une résistance série (R_s) représentant les diverses résistances de contact et de connexion et une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N.

Le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (3.5)$$

- Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de figure 3.4.

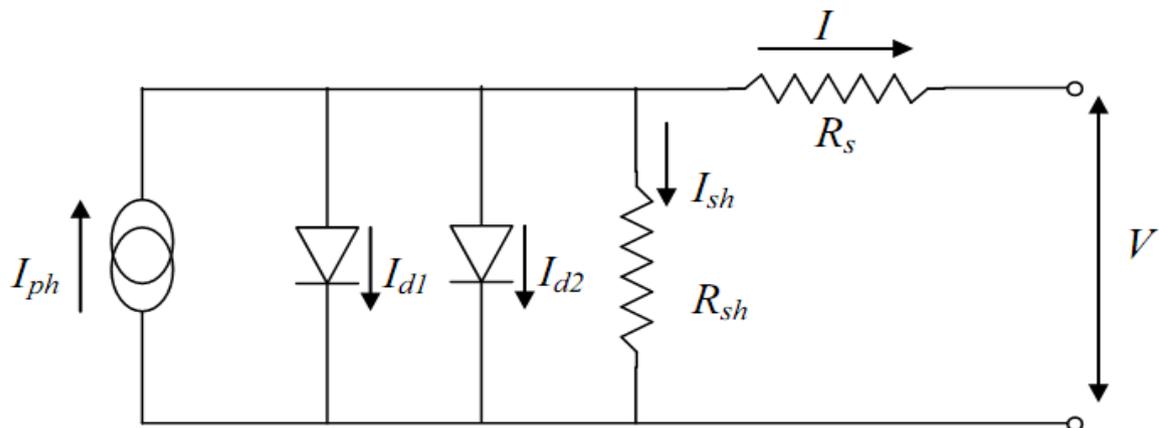


Fig.3.4: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes. [17]

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (III.6).

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{2A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Avec :

I_{s1} et I_{s2} : Sont les courants de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.

- Modèle explicite

Ce modèle est déduit après certaines approximations effectuées sur le modèle à une diode et ne nécessite que trois points significatifs de la courbe I-V : le courant de court-circuit I_{sc} , la tension de circuit-ouvert V_{oc} , le courant I_m et la tension V_m au point de puissance optimale [17]. La caractéristique I-V est décrite par :

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) \right] \quad (3.7)$$

Avec :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \quad C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)}$$

- Modèle à quatre paramètres

Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s , l'effet de la résistance parallèle R_{sh} est très petit dans module simple, ainsi le module ne l'inclut pas (figure 3.5).

Les quatre paramètres apparaissent dans l'équation de la caractéristique I(V) sont : le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_s et A .

Ces paramètres doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations I(V) pour différents points de fonctionnement.

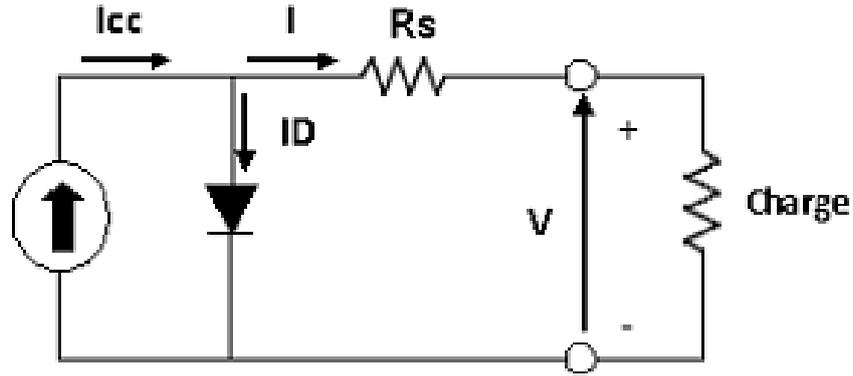


Fig.3.5 : circuit équivalent du modèle à quatre paramètres. [17]

Le courant de sortie déduit de schéma équivalent est le suivant :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

3.3.4 Simulation de modèle à une diode par Matlab

Le courant généré par le générateur est donnée par l'équation (3.9) :

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

- Calcul du courant photonique I_{ph} :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot [I_{phref} + \mu_{Ics} \cdot (T - T_{ref})] \quad (3.10)$$

Où :

G et G_{ref} : Irradiation effective et de référence [W/m^2].

T et T_{ref} : Température effective et de référence [K].

μ_{Ics} : Coefficient de température du photo-courant(ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en générale positif mais très faible.

- Calcul du courant de saturation I_s

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_s = I_{sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right] \quad (3.11)$$

Où :

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_G = 1.12$ eV, Silicium amorphe $E_G = 1.7$ eV, CIS=1.03 eV, CdTe = 1.5 EV).

Les conditions de référence G et G_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{oc} , I_{sc} , V_m , I_m), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC(Standard Test Conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module.

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées utilisant les données de fabrications du module photovoltaïques.

- Calcul de la température de jonction

$$T_j = \frac{NOCT - 20}{0,8} G + T_a \quad (3.12)$$

Avec :

NOCT : Température nominale de fonctionnement.

T_a : Température ambiante

La stratégie de modeler un module PV n'est aucun différent de modeler une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension à circuit ouvert) est différente et doit être diviser par le nombre de cellules et le courant par le nombre de cellules en parallèle.

Donc l'équation (9.9) devient :

$$\left(I + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = npI_{sc} - npI_s \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right)}{AkT_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{n_s R_s h} \quad (3.13)$$

Avec :

n_s : Nombre de cellules en série,

n_p : Nombre de cellules en parallèle.

- Résolution de l'équation I(V)

Après la détermination des différents paramètres du circuit équivalent, il est possible de résoudre l'équation (3.13) de la caractéristique I(V) par la méthode de Newton-Raphson qui est décrite par la formule (3.14) suivante :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.14)$$

Où : $f(x_n)$ est le dérivé de la fonction.

x_n : La valeur actuelle.

x_{n+1} : La valeur prochaine.

Le réarrangement de l'équation (3.13) donne la fonction suivante :

$$f(I) = \left(I + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - npI_{sc} + npI_s \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right)}{AkT_j} \right] - 1 \right\} + \frac{V}{n_s R_s h} \quad (3.15)$$

La dérivée de $f(I)$ égale à :

$$f'(I) = \left(I + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + np \left(\frac{qR_s}{AkT_j} \right) I_s \left\{ \exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right)}{AkT_j} \right] - 1 \right\} \quad (3.16)$$

- Choix du module photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons choisi le module photovoltaïque du type PW6110. (Voir annexe 1). Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques du module PW6110.

Paramètres	Symboles	Valeurs
Température [°C]	T	25
Courant de court-circuit [A]	I_{sc}	6,5
Tension de circuit ouvert [V]	V_{oc}	21.5
Tension de puissance maximale [V]	V_m	16.7
Courant de puissance maximale [A]	I_m	6,0
Puissance maximale [W]	P_m	110
Résistance série [Ω]	R_s	$5e^{-5}$
Résistance shunt [Ω]	R_{sh}	$5e^5$
Température nominale de fonctionnement [°C]	$NOCT$	44
Nombre de cellules en série	n_s	36
Nombre de cellules en parallèle	n_p	2

Toutes les fonctions décrites dans la section sont représentées dans l'organigramme suivant :

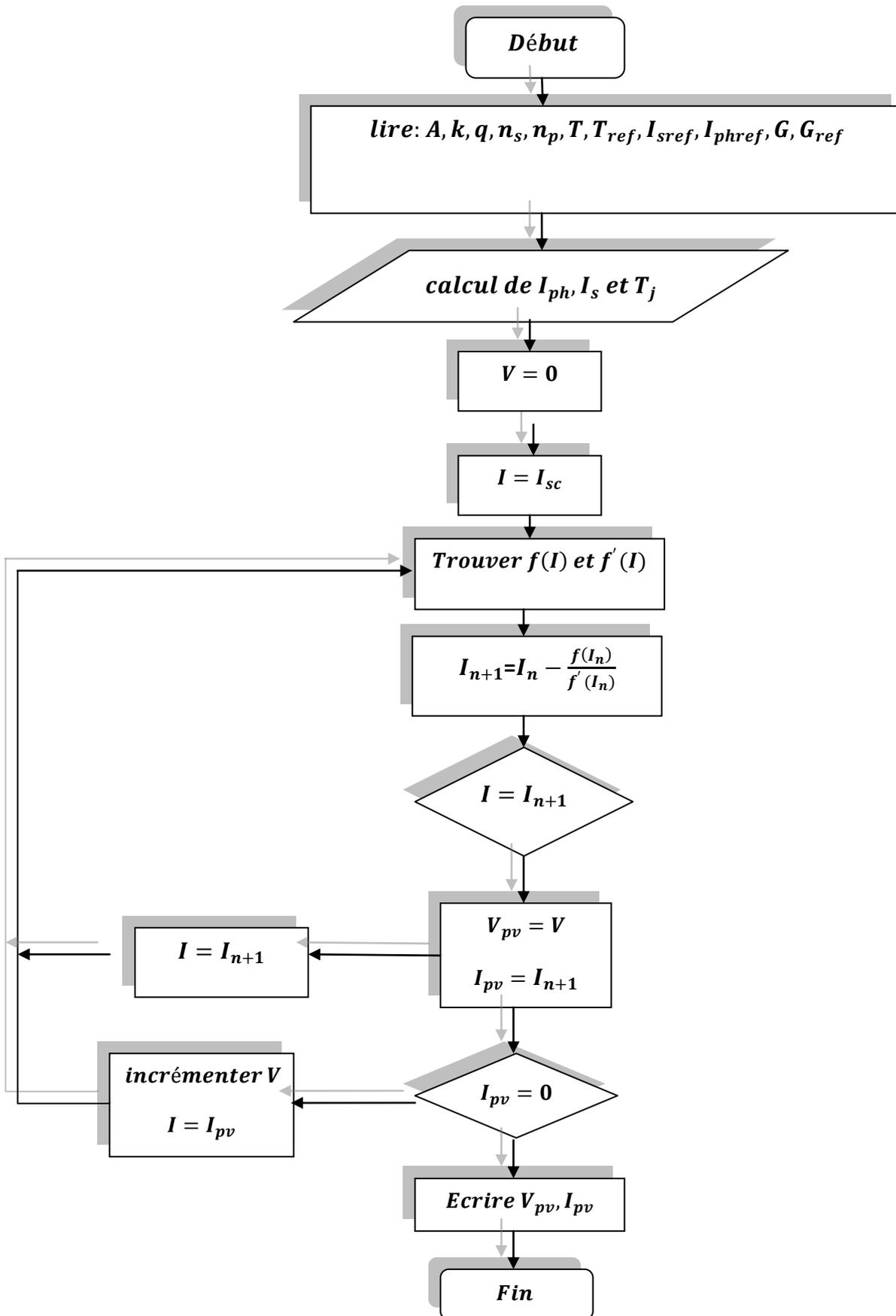


Fig.3.6 : Organigramme de calcul de courant et tension sortie du module.

- Résultats de la simulation

- Caractéristiques courant-tension I(V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire Type PW6110 de 36 cellules en série et 2 cellules en parallèle définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (Figure 3.7).

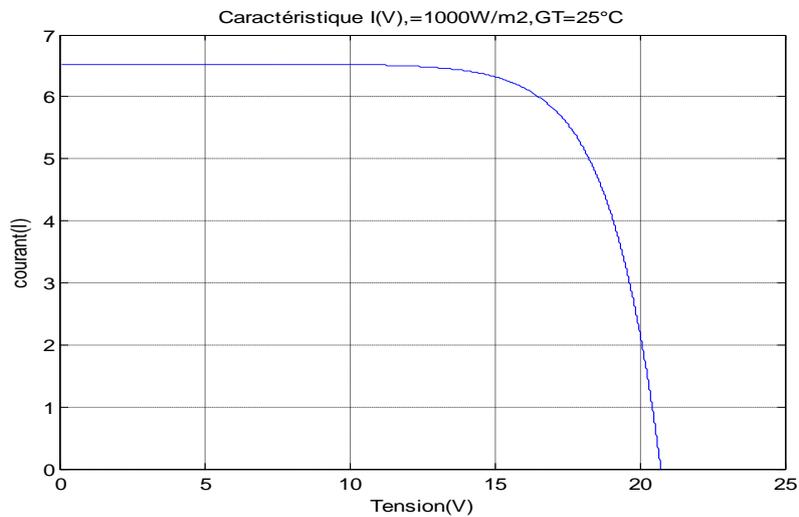


Fig.3.7 : Caractéristique I(V) d'un module solaire.

- Caractéristique puissance-tension P(V)

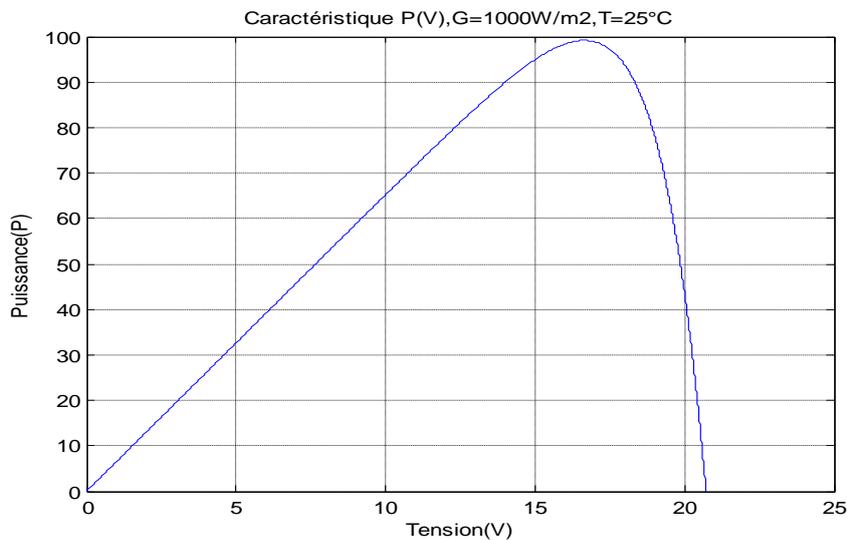


Fig.3.8: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV.

La puissance débitée par le module PV dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité du courant et de la tension entre ses bornes, comme montre la figure 3.8

- Zones de caractéristiques I(V) d'un générateur PV

Les caractéristiques fondamentales d'un générateur PV donné par un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe I(V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

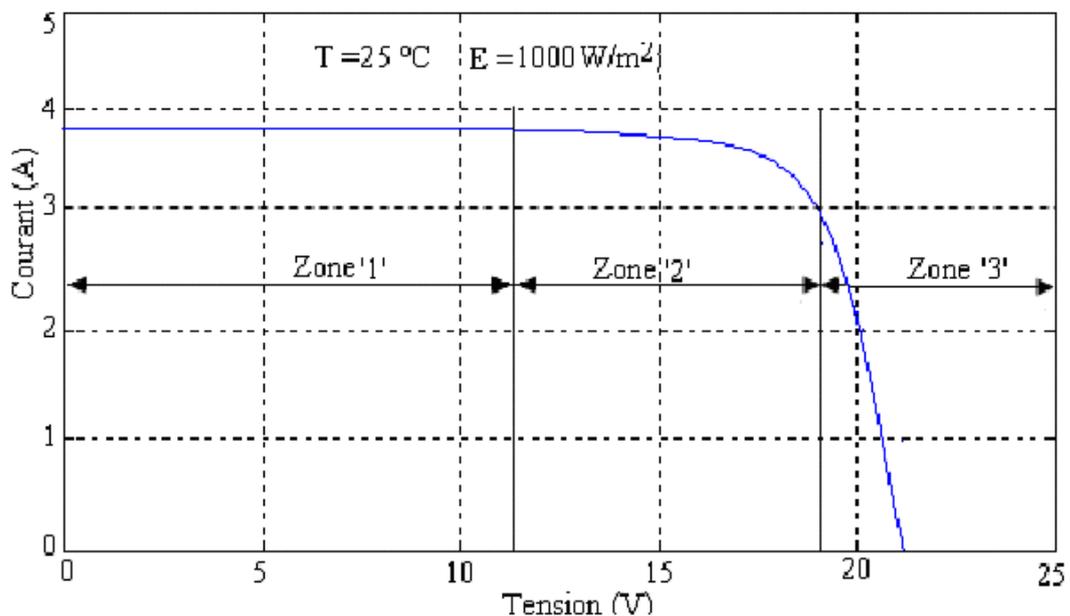


Fig.3.9 : les différentes zones de caractéristiques I(V) d'un générateur photovoltaïque.

La figure 3.9 représente trois zones essentielles :

- La zone (1) où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2) correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisée par une puissance maximale) peut être déterminée.
- La zone (3) qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

- Paramètres influant sur la caractéristique I(V) et P(V)
- Influence de l'éclairement

Les figures 3.10 et 3.11 représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

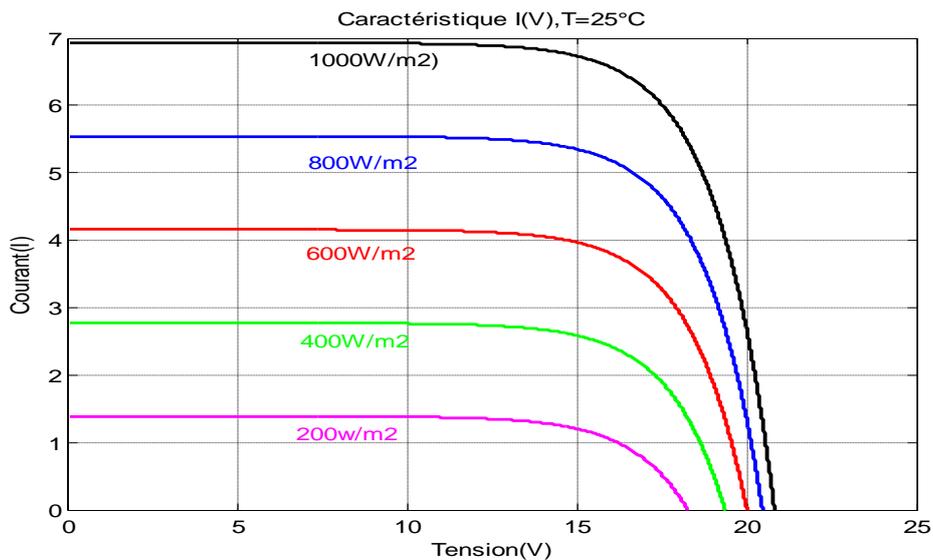


Fig.3.10 : Caractéristique I-V pour différentes éclaircements.

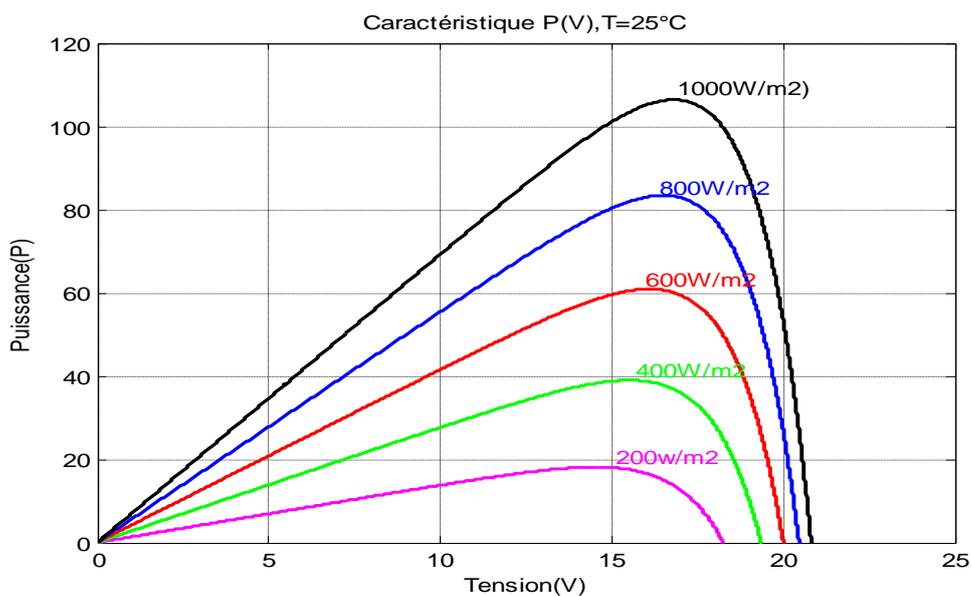


Fig.3.11 : Caractéristique P-V pour différente éclaircements.

On remarque que la tension maximale V_m correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_m qui augmente fortement avec l'éclairement.

➤ Influence de la température

La figure 3.12 et 3.13 représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement constant.

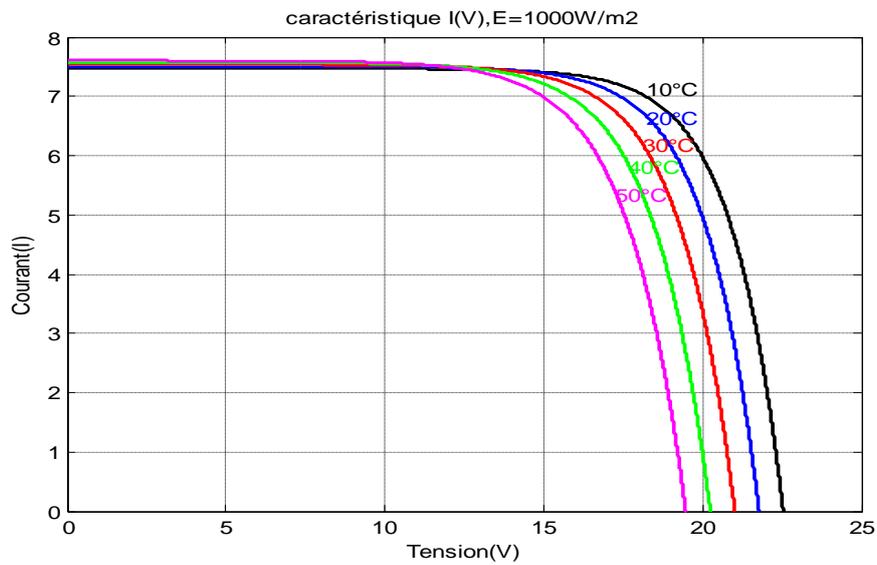


Fig.3.12: Caractéristiques I-V pour différentes températures

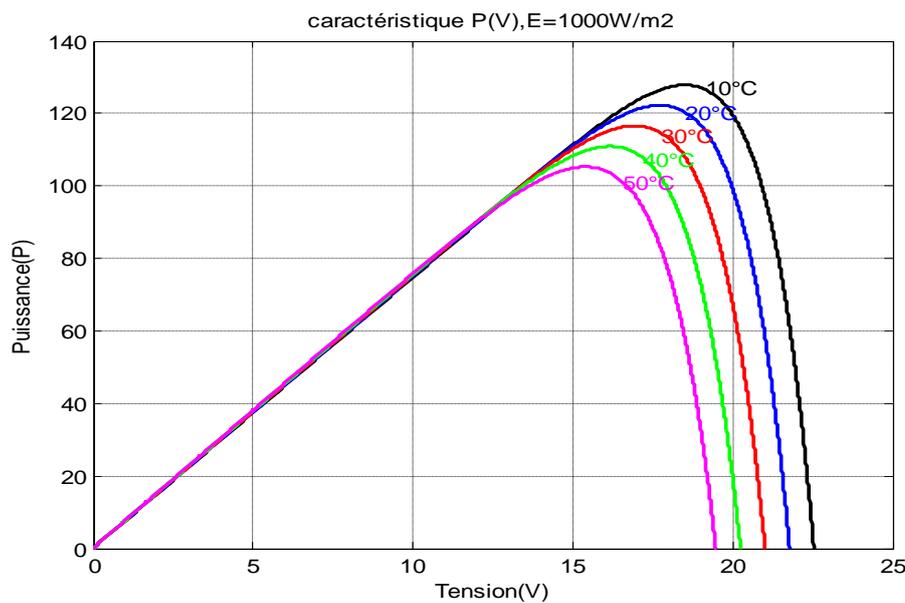


Fig.3.13 : Caractéristique P-V pour différentes températures.

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

➤ **Influence de la résistance série :**

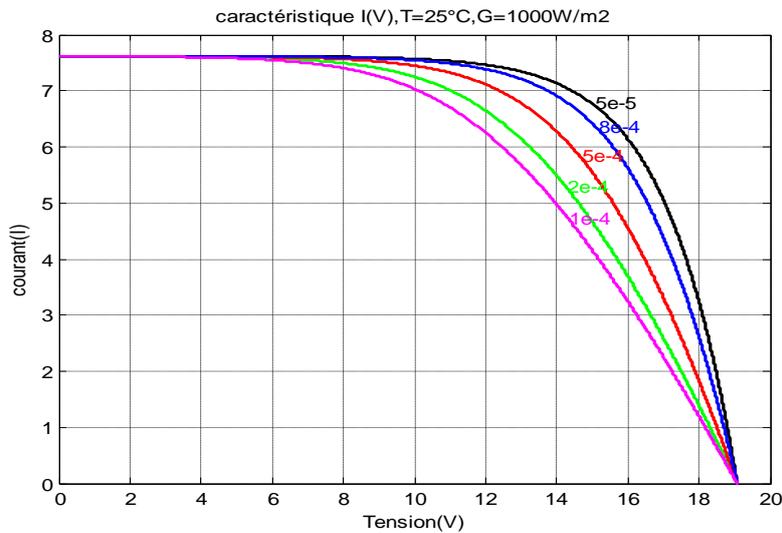


Fig.3.14 : Caractéristiques I-V pour différentes valeurs de résistance série.

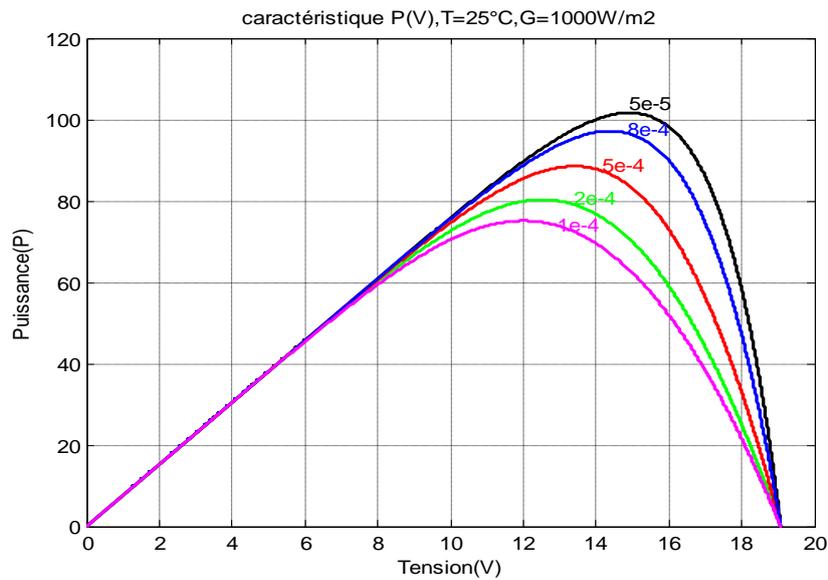


Fig.3.15 : Caractéristiques P-V pour différentes valeurs de résistance série.

La résistance série est résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [5]

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.

➤ **Influence de la résistance shunt :**

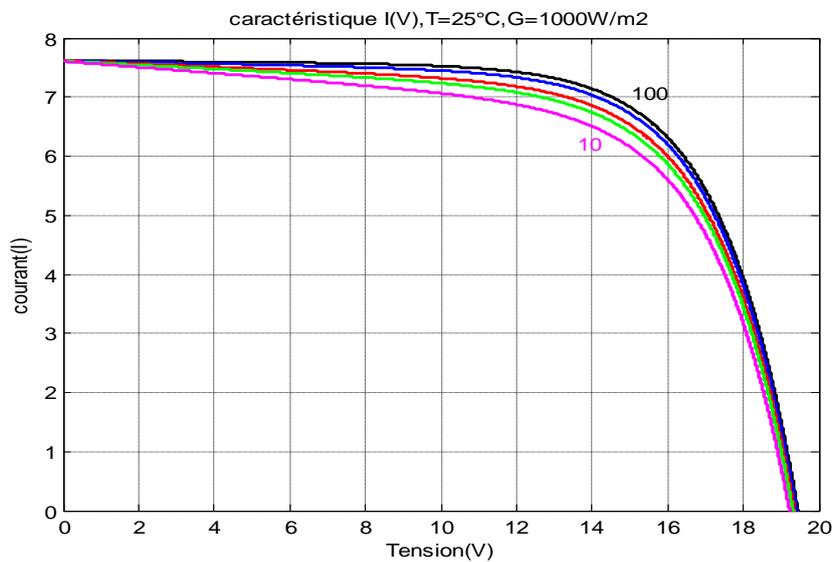


Fig.3.16 : Caractéristiques I-V pour différentes valeurs de résistance shunt.

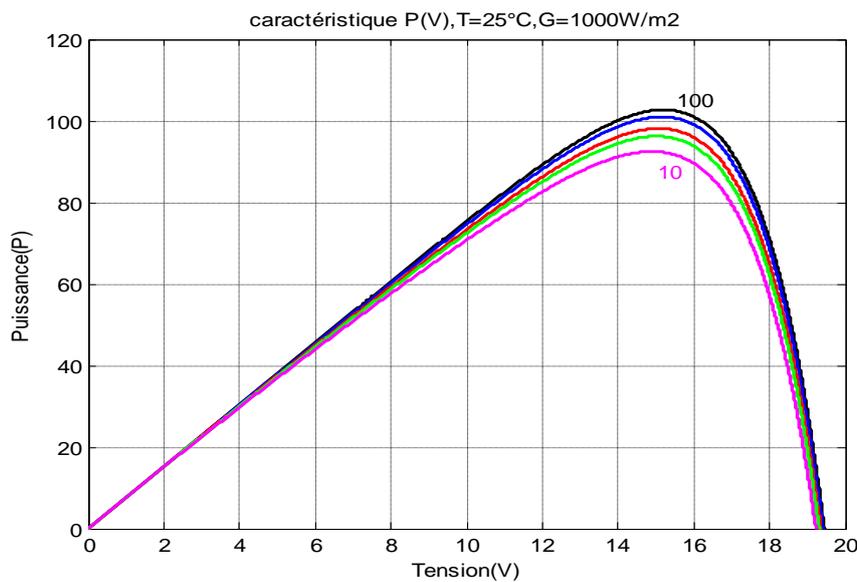


Fig3.17 : Caractéristique P-V pour différentes valeurs de résistance shunt.

Les figure 3.16 et 3.17 montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe I(V) du panneau dans la zone correspondante comme une source de courant. La résistance Shunt est liée directement au processus de fabrication et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant (proche de courant de court-circuit).

- Recherche du point optimal de fonctionnement

Sur chaque courbe de la figure 3.18, on voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension qui maximise la puissance produite par le générateur. Il peut donc être intéressant d'insérer un convertisseur de puissance entre le générateur photovoltaïque et sa charge pour un fonctionnement à puissance maximale quelles que soient la charge et les conditions d'éclairement et de température.

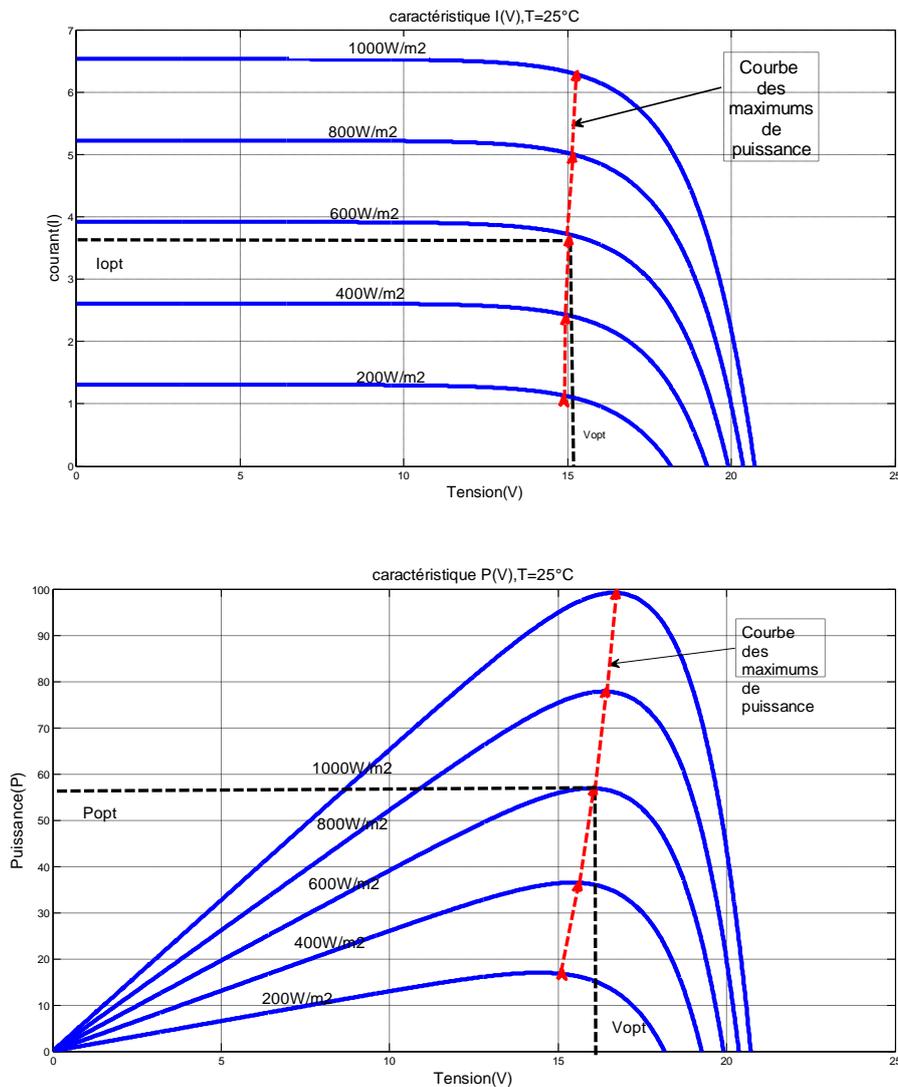


Fig.3.18 : Points de puissance maximale du générateur PW6110.

Le tableau 3.2 donne la puissance maximale calculée en fonction du rayonnement et de la température.

Tableau 3.2 : Point de puissance maximale en fonction de l'irradiation et la température
PW6110.

	G, W/m²				
	1000	800	600	400	200
P_{MPP,W}	99,15	77,82	56,87	36,47	16,98
	Ta, °C				
	10	20	30	40	50
P_{MPP,W}	109,50	104,68	99,84	94,97	90,08

3.3.5 Méthodes de recherche du point optimal de fonctionnement

Dans le but d'optimiser l'investissement dans le générateur photovoltaïque, on souhaite toujours faire fonctionner celui-ci à son point de puissance maximale (MPP).

L'onduleur central DC /AC, placé aux bornes du générateur PV, contient un algorithme de recherche du MPP et a pour rôle, entre autre d'imposer la tension « V_{mmp} » aux bornes du module.

Plusieurs algorithmes permettant la recherche des points de maximum de puissance sont présentés et validés dans la littérature. On cite : la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de la conductance incrémentale (IncCond).

- Méthode de perturbation et observation

C'est l'algorithme le plus généralement utilisé pour la recherche de l'MMPT (Maximum Power Point Trackers), en raison de sa facilité d'exécution sous sa forme de base. Le principe des commandes MPPT de type P et O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte.

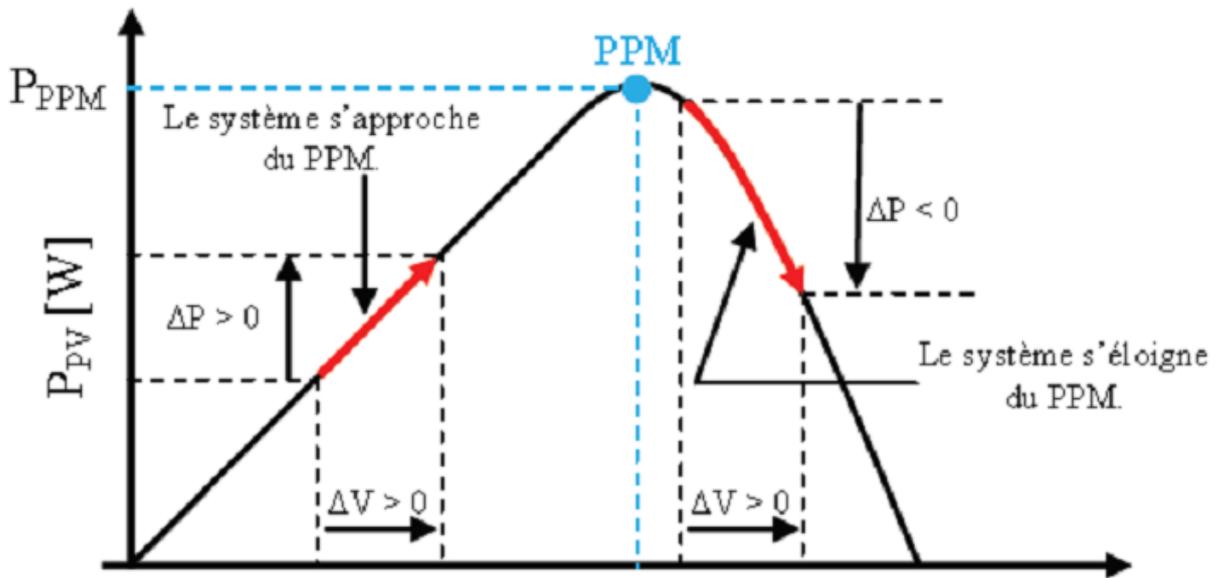


Fig.3.19: Point de puissance maximale d'un panneau PV.[3]

Le diagramme de l'algorithme PetO est représenté par la figure 3.20 :

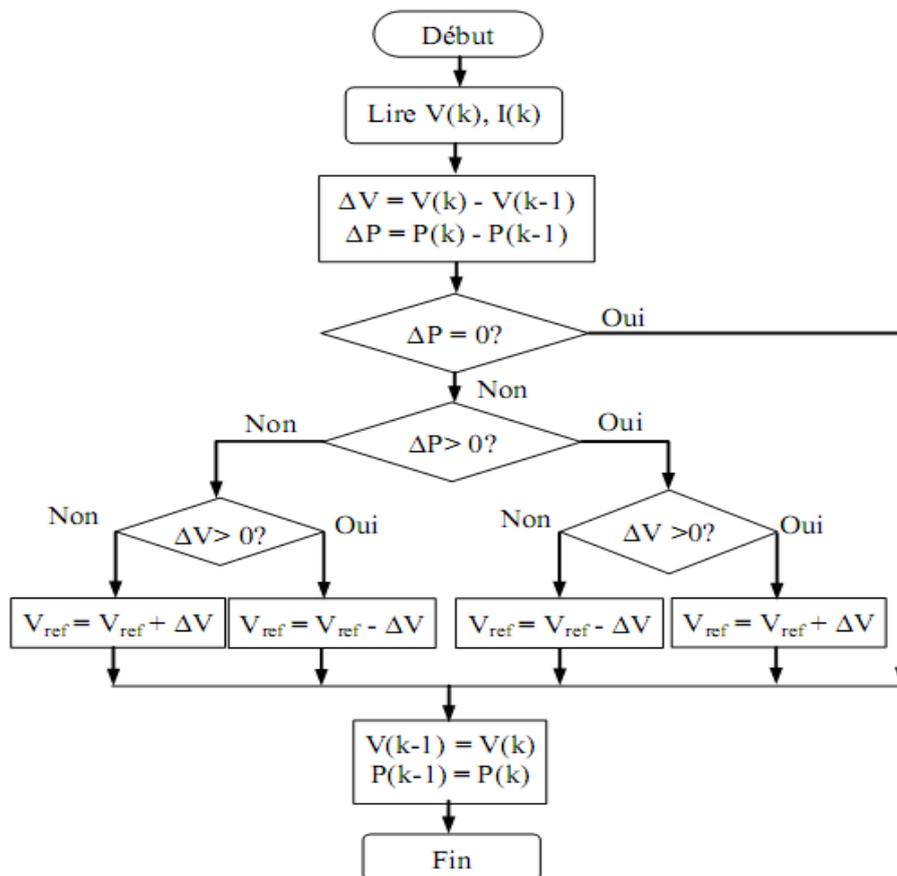


Fig.3.20 : Organigramme de l'algorithme de perturbation et d'observation.[3]

Ainsi, comme l'illustre la figure 3.19, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPPT. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPPT. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. [3]

- Algorithme d'incrément de l'inductance

Cette méthode utilise l'ondulation du courant en sortie du hacheur pour maximiser la puissance du panneau en extrapolant dynamiquement la caractéristique du panneau. En effet 1% de variation en amont provoque une variation d'environ 10% de l'intensité (pentes des caractéristiques). La puissance fournie par le panneau PV est donnée par le produit de la tension à ses bornes par l'intensité du courant délivrée ($P = I.V$), ce qui permet d'écrire :

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}, V > 0 \quad (3.17)$$

La conductance G s'exprime par : $G = \frac{I}{V}$

La variation de la conductance sera alors : $\Delta G = -\frac{dI}{dV}$

$$\text{Ce qui donne : } \begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0, \text{ si } G > \Delta G \\ \frac{dP}{dV} = 0, \text{ si } G = \Delta G \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{ si } G < \Delta G \end{cases}$$

Ainsi, les comportements instantanés du panneau (tension, intensité, puissance) peuvent être groupés en trois cas :

- Courant loin du maximum de puissance,
- Courant près du maximum,
- Courant au-delà du maximum.

L'algorithme de la conductance incrémentale est donné par la figure 3.21.

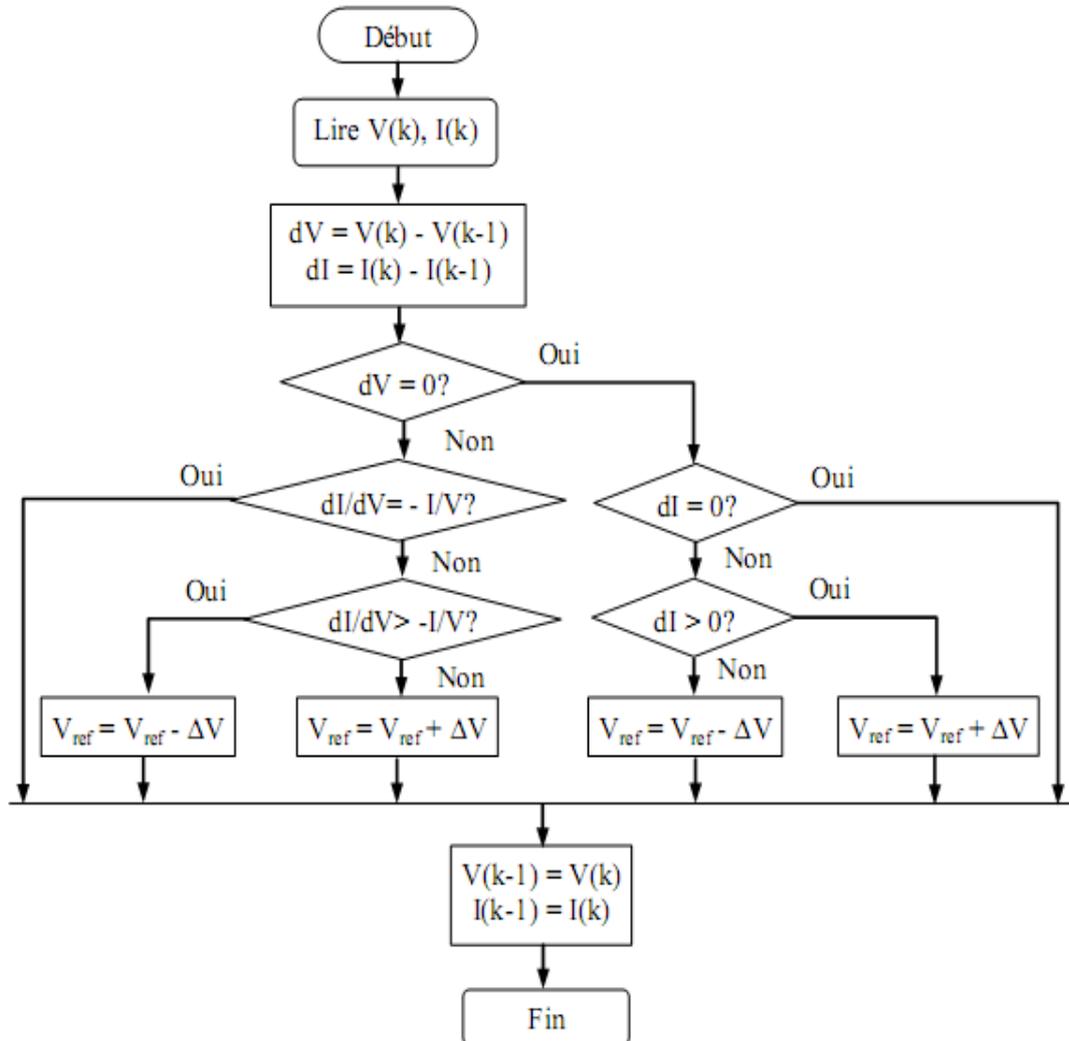


Fig.3.21 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale [3]

Les performances du panneau PV sont donc connues et enregistrés à chaque instant dans fichier, qui analyse le produit des dérivées de la puissance P et de la tension V. Si ce produit est négatif, le courant est en dessous du maximum de puissance et vice versa. Ainsi, en régulant la tension de manière à avoir le produit $\frac{dP}{dt}$ par $\frac{dV}{dt}$ est nul, alors on aura $\frac{dP}{dV} = 0$ et la puissance sera maximisée. Cette méthode est plus efficace que la méthode de PetO, est indépendante des caractéristiques de différents composants utilisés.

3.4 Modélisation du système de conversion (convertisseur) :

3.4.1 Modélisation énergétique d'un onduleur type

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant sa puissance de sortie à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction :

$$\eta_0=f(P_{ch}) \text{ ou encore } \eta_0=f(\text{taux de charge})$$

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc placé entre le générateur PV et la charge. Voir figure (3.1).

Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisateur. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique : [1]

$$\eta_{ond} = a \cdot (1 - \exp (b \cdot \tau)) \quad (3.18)$$

Avec :

a et b sont des constantes

$$a = 0.9559,$$

$$b = - 609164).$$

τ : Taux de charge, donné par :

$$\tau = \frac{P_{ch}}{P_n} \quad (3.19)$$

P_n : Puissance nominale de l'onduleur.

P_{ch} : Puissance à la sortie de l'onduleur.

La variation du rendement de l'onduleur en fonction de taux de charge est représentée sur la figure 3.22.

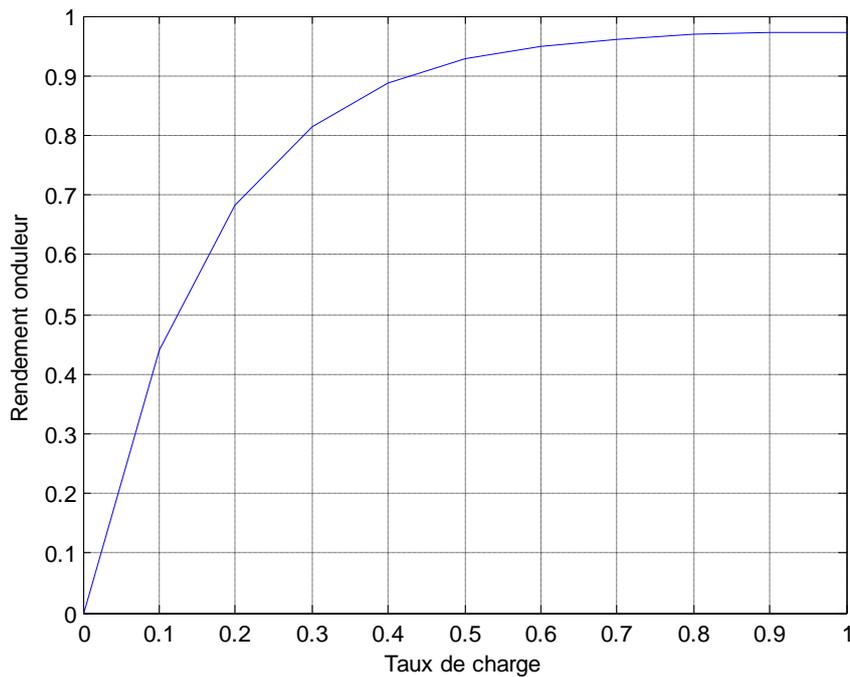


Fig.3.22 : Rendement type d'un onduleur en fonction de taux charge

3.4.2 Choix d'un onduleur

Dans notre, nous avons choisi un onduleur central de type « injection pure » modèle Sunny Boy 4 000 TL qui transforme le courant issu des panneaux solaires en courant alternatif sinusoïdal injecté dans le réseau (annexe 2).

Le rendement de l'onduleur s'exprime selon la formule mathématique suivante :

$$\eta = \frac{\text{Puissance en sortie}}{\text{Puissance en entrée}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (3.20)$$

La puissance d'entrée $P_{DC} = U_{DC} \times I_{DC}$.

La puissance de sortie $P_{AC} = U_{\text{eff,AC}} \times I_{\text{eff,AC}} \times \cos \varphi$.

La courbe de la figure(III.25) représente l'évolution du rendement de l'onduleur Sunny Boy 4 000 TL de la marque SMA en fonction de la puissance de sortie AC.

Le rendement maximal est de 97 %. Celui-ci est atteint pour une puissance de sortie coté AC égale à 3 000 W, soit ± 70 % de la puissance nominale de l'onduleur.

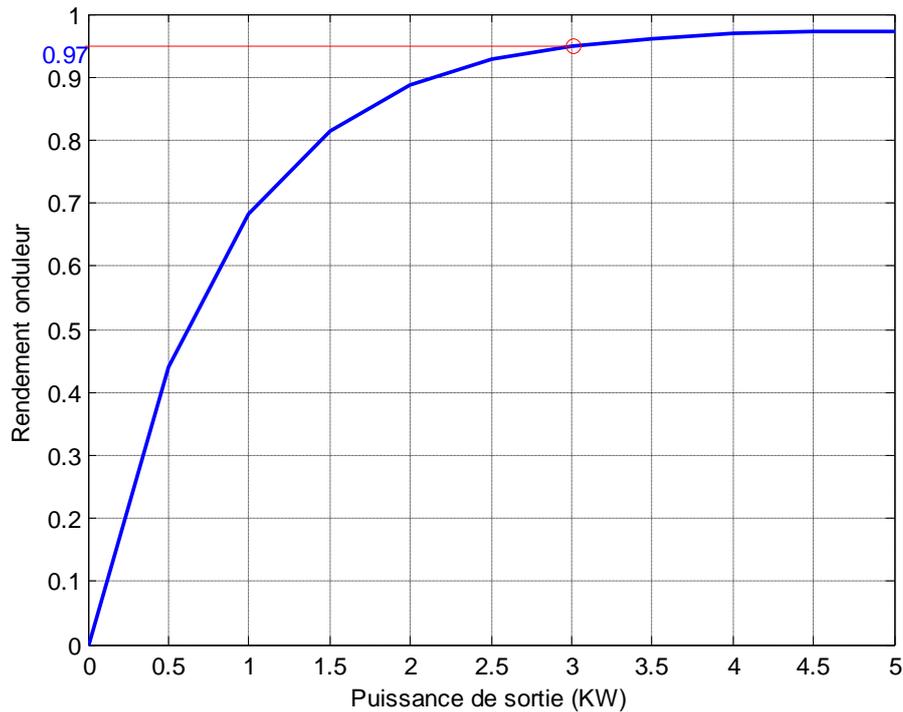


Fig.3.23: Courbe de rendement SUNNY BOY 4000TL.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre un système photovoltaïque connecté au réseau. Les modèles de module photovoltaïque et onduleur central ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux :

- Le modèle des panneaux PV est précis et tient compte de la valorisation d'ensoleillement ainsi que la température.
- L'onduleur central peut faire face aux forts appels de courant, garantissant ainsi la sûreté de fonctionnement du système.
- En considérant que la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé que qu'ils fonctionnent dans conditions optimales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT).

4.1 Introduction

La diminution de la consommation énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur de ce début de siècle. La réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite le développement d'outils performants d'assistance à leur conception, leur construction et leur maintenance. Elles nécessitent aussi une approche particulière. En effet, le choix technique architecturaux retenus pour ce genre de conception influent de manière très importante sur le comportement énergétique du bâtiment. Ainsi, la forme du bâtiment, sa capacité, son orientation, ont des conséquences significatives sur sa performance énergétique. Il en va de même pour le choix des systèmes de ventilation, de chauffage, etc. de mauvais choix peuvent entraîner des défaillances difficilement prévisibles dont l'impact sur la consommation énergétique du bâtiment n'est souvent découvert que lors de son exploitation. Ce chapitre rappelle tout d'abord les principaux labels nationaux et internationaux. Il parcourt ensuite, différents concepts de bâtiments performants et en présente les principes et nuances, en insistant sur le concept de maisons bioclimatique et passive et en en présentent les caractéristiques fondamentales.

4.2 Principaux labels nationaux et internationaux

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment.

4.2.1 Les labels français

En France, la réglementation propose cinq labels (HPE, THPE, HPE EnR, THPE EnR et BBC 2005). [15]

Le label performance concerne les logements neufs individuels ou groupés et s'inscrit dans une démarche de développement durable. Ce label valorise tout particulièrement les équipements et les solutions techniques qui contribuent à la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Il se décline en cinq niveaux de performance.

- ✓ HPE (haute performance énergétique) qui concerne les constructions dont les consommations énergétiques conventionnelles sont au moins inférieures de 10% de la consommation de référence.
- ✓ THPE (très haute performance énergétique) qui s'applique aux constructions dont les consommations énergétiques conventionnelles sont au moins inférieures de 20% de la consommation de référence.
- ✓ HPE EnR (haute performance énergétique énergies renouvelables) qui s'adresse aux bâtiments respectant les exigences du niveau HPE et dont au moins 50% de l'énergie employée pour le chauffage est issue d'une installation de biomasse ou d'une alimentation par un réseau de chaleur utilisant plus de 60% d'énergies renouvelables.
- ✓ THPE EnR (très haute performance énergétique énergies renouvelables) qui a pour objectif un gain d'au moins 30% par rapport à la consommation de référence. Les constructions concernées devront également utiliser des énergies renouvelables comme la biomasse, le solaire thermique ou photovoltaïque (pompe à chaleur incluse).
- ✓ BBC (bâtiments basse consommation) qui est attribué aux bâtiments de logements neufs consommant au maximum 50 kWh/m² par an. Il impose de contrôler la perméabilité de l'air de la construction dans le but d'augmenter la qualité du logement.

- ✓ BBC 2005 (label Bâtiment Basse Consommation) : consommation de l'ordre de 50 kWh/m².an. Il faut inclure dans le calcul : le chauffage, la ventilation et clim, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage. L'électroménager n'est pas compté.

4.2.2 PassivHaus (Allemagne)

PassivHaus [14] est un label développé par l'institut de recherche allemand PassivHaus, créé par le Dr. Wolfgang Feist en 1996. Ce label s'applique aux bâtiments résidentiel et tertiaire tant en réhabilitation qu'en construction neuve. Le concept de PassivHaus désigne des bâtiments dont les besoins énergétiques pour le chauffage sont inférieurs à 15 kWh /m².an et une consommation en énergie primaire inférieure à 120 kWh/m².an pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité (en plus des usages domestiques).

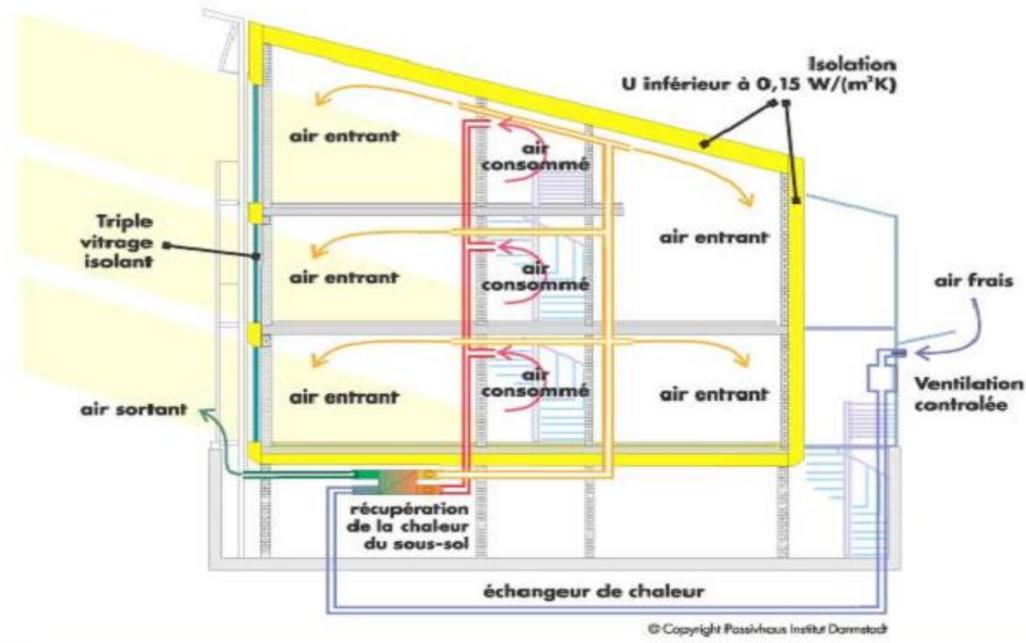


Fig.4.1 : Schématisation des principes de la conception d'une maison passive [15]

Ces bâtiments se veulent confortables tant en hiver qu'en été sans avoir à faire appel à un système conventionnel actif de chauffage ou de climatisation. Un bâtiment PassivHaus est composé d'une enveloppe avec une isolation thermique très performante et intégrant un triple vitrage isolant, d'une très faible perméabilité à l'air, une récupération d'énergie sur la ventilation et par préchauffage de l'air neuf (double flux avec récupération, puits climatique) et de sources d'énergies renouvelables. [15]

4.2.3 ZERO ENERGY BUILDING (USA)

ZeroEnergy Building est un concept qui est apparu suite à la construction d'une maison sans consommation de chauffage, dans la Task 13 « Solarlowenergy house » de l'Agence International de l'Energie (AIE) sous la direction scientifique du Fraunhofer Institut. [15]

Grâce à des simulations, il a été démontré que les besoins de chauffage peuvent être assurés par l'installation solaire, ce qui ramène sa consommation à zéro.

Parmi les principaux objectifs de ce label :

- ✓ La réalisation de bâtiments consommant 30 à 90% d'énergie en moins pour le neuf et de 20 à 30% de moins pour l'existant.

- ✓ L'intégration de systèmes de production décentralisée afin d'arriver en 2020 à des bâtiments à zéro énergie.
- ✓ Le développement des technologies qui réduisent les consommations d'énergie et de matière.

Le programme « Zero Energy Home » est aussi déployé au Canada, au Japon, en Allemagne, en Nouvelle-Zélande. [15] Ces programmes sont basés sur un même principe à savoir réduire au maximum les besoins au chauffage, de refroidissement et d'électricité, grâce à une enveloppe et des équipements performants et économes dont les besoins en énergie sont satisfaits par du solaire photovoltaïque et thermique.

4.2.4 MINERGIE® (Suisse)

MINERGIE® est un label de qualité énergétique et de confort des bâtiments d'origine suisse. Ce label est destiné aux bâtiments neufs et rénovés. Il favorise une utilisation rationnelle des ressources énergétiques et l'adoption des énergies renouvelables pour assurer le confort de ses occupants. L'une des conditions d'obtention de ce label, outre une consommation de chauffage, ESC (Eau chaude sanitaire), ventilation, rafraîchissement, inférieur à un seuil de référence en énergie primaire est de limiter les surcoûts de construction par rapport à un bâtiment standard [15].

Trois sous labels ont été créés pour les bâtiments à basse et à très basse énergie.

- ✓ MINERGIE® vise le résidentiel individuel et collectif et le tertiaire, en neuf et en rénovation. Cinq exigences suivant la catégorie de bâtiment ont été mises en œuvre pour atteindre ce label. Ces exigences agissent sur : l'enveloppe, les systèmes de ventilation (Mécanique obligatoire), les consommations annuelles d'énergie, et le surcoût inférieur ou égale à 10% par rapport à un bâtiment standard.
- ✓ MINERGIE®-P est destiné aux bâtiments résidentiels (collectif ou individuel) et administratif. Il correspond au standard « PassivHaus » dont les consommations d'énergies sont inférieures au standard MINERGIE®. Un surcoût égal au maximum à 15% d'une construction comparable est toléré dans le cadre de ce label.
- ✓ MINERGIE®-ECO représente un complément du standard MINERGIE®. Alors que les caractéristiques liées à l'économie d'énergie et au confort sont identiques à

MINERGIE® ou MINERGIE®-P, cette nouvelle certification intègre des exigences supplémentaires en matière de construction saine (lumière, bruit et air intérieur) et écologiques (matière première, fabrication et déconstruction).

Le standard MINERGIE® se base sur une enveloppe très isolée intégrant un double ou triple vitrage, une très bonne étanchéité à l'air, une récupération d'énergie sur la ventilation, un électroménager performant et l'intégration des énergies renouvelables.

La figure 4.2 présente une comparaison des exigences des deux standards MINIERGIE® et MINERGIE® -P, pour lesquels la consommation d'énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la consommation électrique (ventilation et climatisation) varie de 45kWh/m².an à 30 kWh/m².an.

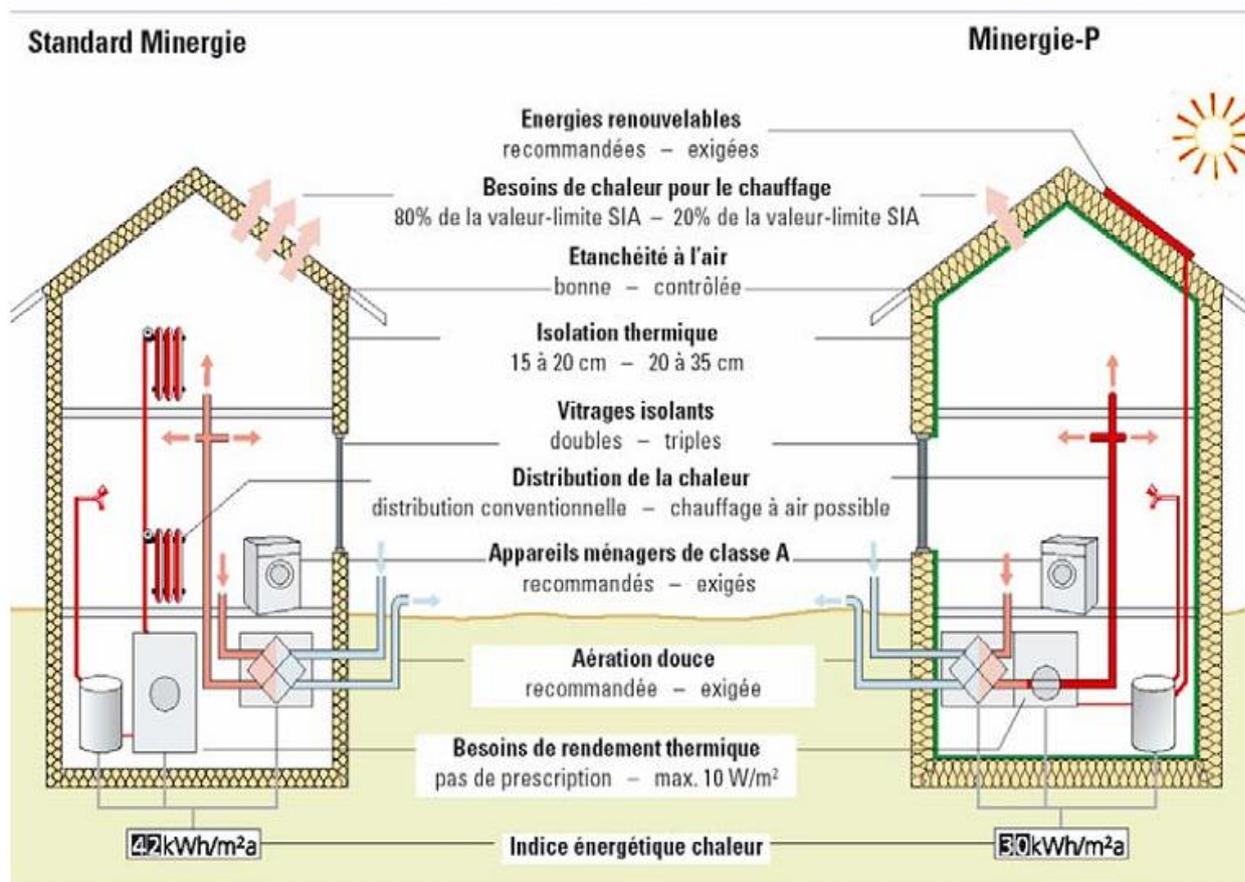


Fig.4.2 : Exigence des standards MINIERGIE® et MINERGIE® -P [15]

4.2.5 Normes et labels algériens

Le secteur résidentiel est à l'origine de 35% de la consommation d'énergie finale en Algérie; la construction de nouveaux bâtiments progresse rapidement et l'impact sur la demande d'énergie sera énorme et durable.

L'introduction des normes énergétiques dans le code des bâtiments semble n'avoir aucun effet perceptible, mais l'APRU (établissement public à caractère industriel et commercial, créée par décret présidentiel en 1985) a adopté un programme ECO-BAT qui s'adresse au secteur de l'habitat avec pour objectifs :

- ✓ Améliorer le confort thermique dans les logements et réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation ;
- ✓ Mobiliser les acteurs clés dans le secteur du bâtiment autour de la question de l'efficacité énergétique ;
- ✓ Démontrer la faisabilité des projets à haute performance énergétique en Algérie ;
- ✓ Renforcer les pratiques de formation afin de prendre en considération les aspects de l'efficacité énergétique dans la conception des bâtiments.

La mise en application de la loi 99.09 relative à la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment s'est concrétisée par la promulgation le 24 avril 2000 d'un décret exécutif n°2000-90 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs.

Dans le cadre de cette réglementation le Centre National de la Recherche de l'Industrie du Bâtiment (CNERIB) a préparé trois documents techniques réglementaires à l'usage des professionnels du bâtiment à savoir :

- Le DTR.C 3-2 qui établit les règles de calcul des déperditions calorifiques d'hiver pour les bâtiments à usage d'habitation.
- Le DTR.C 3-4 relatif aux règles de calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments.
- Le DTR.C 3-31 relatif à la ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation.

Cette réglementation dont la finalité est le renforcement de la performance énergétique globale du bâtiment, laisse ainsi de larges possibilités aux concepteurs et aux maîtres d'ouvrage de choisir entre les performances thermiques globales du bâtiment aussi bien dans le choix des matériaux que la conception du cadre bâti.

La mise en application de cette réglementation permettra de réduire les besoins calorifiques de nouveaux logements de l'ordre de 40% pour les besoins en chauffage et en climatisation.

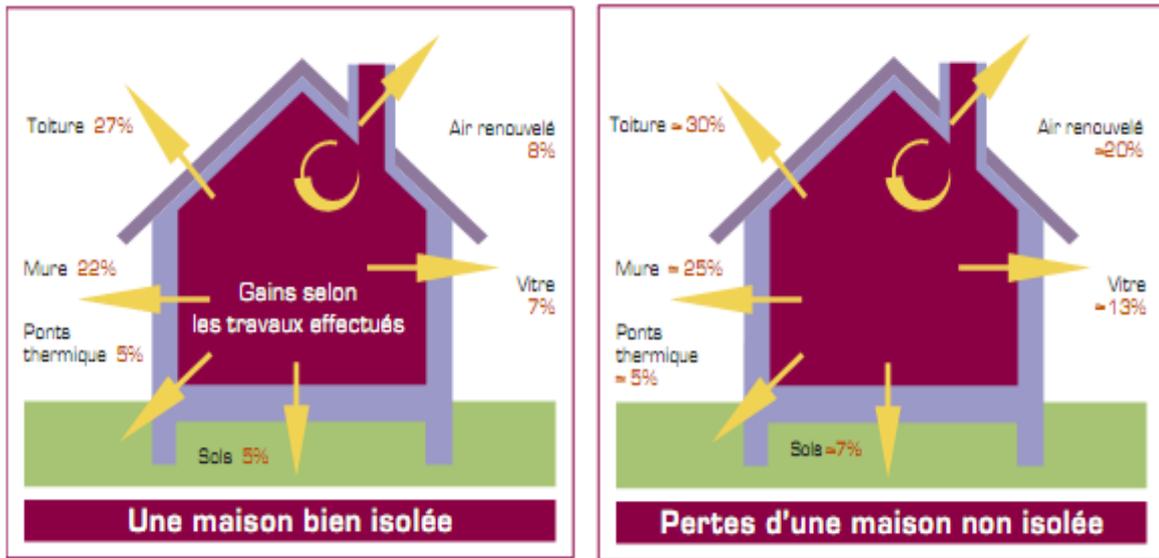


Fig.4.3: Comparaison des pertes d'une maison bien isolée et une maison non isolée [10]

4.3 Maisons « bioclimatiques »

4.3.1 Définitions :

Les maisons bioclimatiques relèvent d'un concept architectural qui exploite au mieux les possibilités offertes par le climat.

- L'architecture bioclimatique « cette expression vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle c'est-à-dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un élément fondamentale de l'art de l'architecture » [13] avec l'objectif de réduire les nuisances en réduisant à la base les besoins énergétiques du bâtiment.
- « L'habitat bioclimatique désigne un bâtiment dans lequel l'architecte profite au maximum des apports solaires, de l'orientation du bâtiment, des éléments architecturaux ou végétaux (ombrages, limitation des réflexions...), dans le but de réduire les besoins en chauffage et en climatisation. »[9]

4.3.2 Principes de base

Le bâtiment bioclimatique se base essentiellement sur une démarche qui vise à composer avec le climat. Ce mode de conception architectural consiste à trouver le meilleur équilibre entre le bâtiment, le climat environnant et le confort de l'habitant. L'architecture bioclimatique tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle pour réduire les besoins énergétiques, tenir des températures agréables, contrôler l'humidité et favoriser l'éclairage naturel.

L'enveloppe bâtie dans ce cas ne se limite pas à définir une frontière entre l'intérieur et l'extérieur, mais joue un rôle plus significatif. Elle vise en outre : [15]

- ✓ Réduire les besoins énergétiques.
- ✓ Offrir un confort thermique satisfaisant en toutes saisons, c'est-à-dire :
 - Un niveau de température interne acceptable,
 - Un contrôle de la surchauffe (faible variation quotidienne de température),
 - Une bonne distribution de la chaleur dans les pièces,
 - Un contrôle de la condensation (bonne conception des parois en fonction de la sollicitation du climat extérieur)

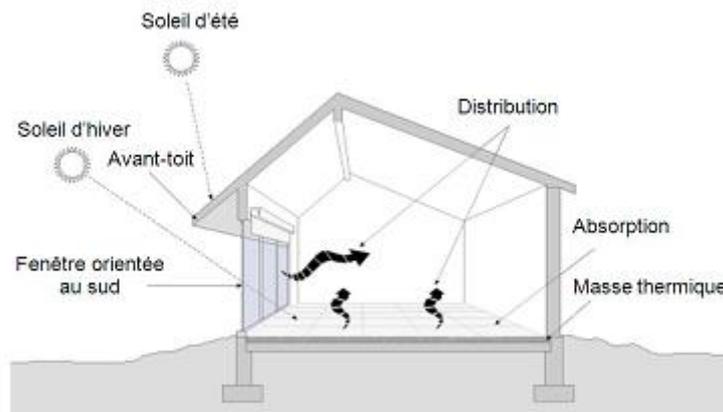


Fig.4.4 : Configuration d'une habitation bioclimatique [15]

4.3.3 Caractéristiques des bâtiments bioclimatiques

Capter la chaleur consiste à recueillir l'énergie solaire et à la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment dépend du climat et de ses variations journalières et

saisonniers, mais aussi de l'orientation du bâtiment, de la nature de ses surfaces et de ses matériaux, de la topographie du lieu, de l'ombrage, etc. Le rayonnement solaire n'est pratiquement utilisable qu'au droit des surfaces vitrées, où il est partiellement transmis à l'ambiance intérieure et fournit un gain direct de chaleur.

- Orientation

Le seul fait d'orienter correctement une habitation et de positionner adéquatement ses fenêtres par rapport au parcours du soleil réduit sa consommation énergétique pour le chauffage et même pour la climatisation. Il faut orienter les baies vitrées vers le sud afin de favoriser la pénétration des rayons du soleil.

Tableau 4.1: Répartition des baies vitrées d'une habitation bioclimatique [9].

Orientation	Caractéristiques	Surface fenêtre / plancher
Sud	Gain solaire positif. Favorable pour les pièces ouvertes (salon, salle à manger, etc.). Nécessite une protection contre les rayons en été.	1/6 à 1/3
Est	Ensoleillement au début de journée. Favorable pour les chambres afin de profiter de la fraîcheur en fin de journée.	1/6 à 1/4
Ouest	Ensoleillement en fin de journée. Nécessite une protection pour contrer la surchauffe en été.	1/6 à 1/4
Nord	Aucun apport solaire. Favorable pour la salle de bain et les pièces froides.	0 à 1/6

Avec cette orientation on peut capter ce rayonnement dès le lever du soleil jusqu'à son coucher. Tandis que le mur situé au Nord ne doit posséder aucune ouverture voire très peu de manière à limiter les pertes calorifiques avec l'extérieur.

- Stratégie du froid et du chaud

Les principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique sont de capter, diffuser et conserver la chaleur en hiver (« stratégie du chaud ») et de protéger, minimiser les apports et dissiper l'énergie en été (« stratégie du froid »).

En été, ces ouvertures seront protégées par des avancées de toiture, de la végétation caduque ou des volets Figure 4.5. On privilégiera la ventilation pour dissiper la chaleur excédentaire

(par exemple en profitant de la température plus clémente de la nuit pour rafraîchir l'habitat ou encore par l'usage d'un puits canadien.

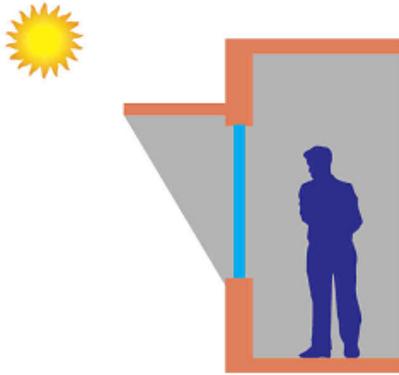


Fig.4.5: stratégie du froid [9]

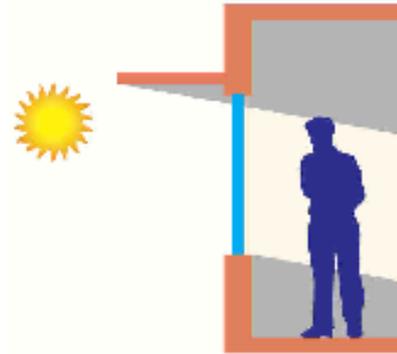


Fig.4.6 : stratégie du chaud [9]

En hiver, le soleil bas sur l'horizon frappera les ouvertures avec un faible rayon d'incidence, pénétrant plus facilement dans l'habitat Figure 4.6. La végétation ayant perdu ses feuilles laissera entrer la lumière. Des matériaux à forte inertie (dalles de sol, chapes en béton, murs intérieurs exposés au soleil, ...) capteront ces rayons lumineux durant la journée, les stockeront et diffuseront durant la nuit la chaleur accumulée.

- Organisation spatiale des pièces

Une autre caractéristique importante de l'architecture bioclimatique est l'organisation des pièces dans l'habitat. Les pièces les plus fréquentées (pièces de vie) (cuisine, salle à manger, séjour et les chambres) doivent se situer le plus possible au Sud. Tandis que les espaces tampons doivent se situer au Nord.

Dans une maison se sont les maisons non-habitable comme les garages, les selliers, les débarras.....qui sont utilisés comme barrières entre l'extérieur et les pièces chauffées. En effet l'air chaud se dirige vers les pièces les plus froides. Les espaces tampons ont donc un rôle d'isolants, ils empêchent les contacts directs entre les espaces vivables et l'extérieur, ils diminuent donc les pertes énergétiques.

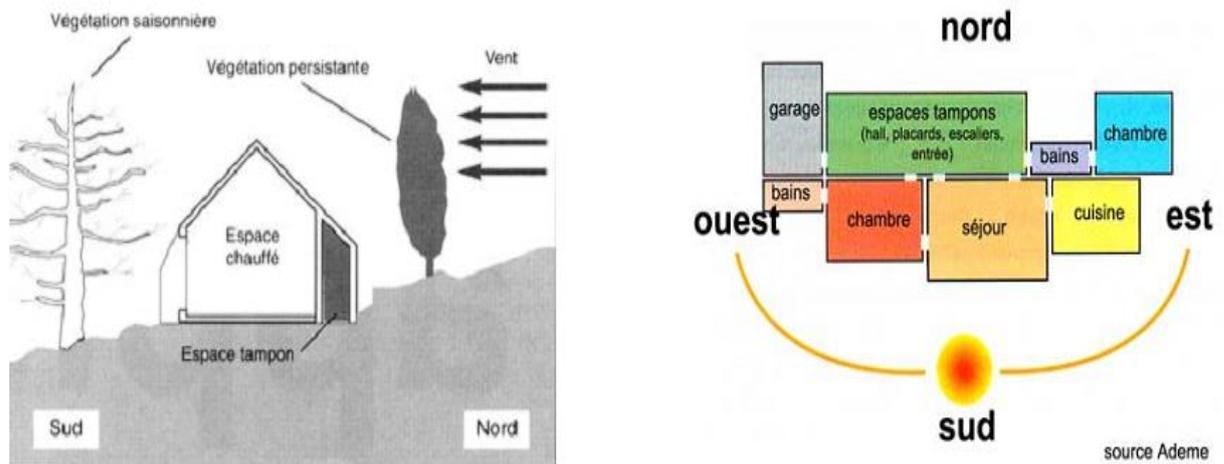


Fig.4.7 : Illustration de quelques principes d'architecture bioclimatique (implantation et organisation spatiale) [15].

L'emplacement d'arbres à feuillage caduc situés à l'ouest, au sud et à l'est des bâtiments constitue un autre moyen efficace et gratuit d'empêcher l'excès de chaleur en été sans réduire l'apport thermique en hiver puisque les branches sont alors dénudées.

- Inertie thermique

Après avoir maximisé le captage du rayonnement solaire, le défi consiste à l'emmagasiner pour que la chaleur redistribuée ultérieurement, c'est-à-dire à la fin de la journée et durant la nuit. La présence de matériaux à forte inertie thermique est nécessaire.

La notion de forte inertie est importante, car c'est grâce à elle que la température extérieure variable sera temporisée. Les murs, dalles de sol, chapes en béton et autres éléments denses et à forte capacité calorifique joueront ainsi le rôle d'un tampon qui permettra de réduire les écarts de température intérieure et de conférer une plus grande stabilité à cette dernière.

- Isolation

Il y a un autre paramètre qui est aussi important que l'orientation de la maison ainsi que de ces pièces : c'est l'isolation. Dans premier temps on a le choix des matériaux de construction et dans un deuxième temps on doit tenir compte des ponts thermiques.

Il faut isoler au maximum le bâtiment vis-à-vis de l'extérieur. Le matériau isolant doit être placé à l'extérieur, ce qui permet de supprimer les ponts thermiques et d'augmenter l'inertie thermique.

Des épaisseurs d'isolant de l'ordre de 30 à 35 cm se rencontrent dans les murs, 40 à 45 cm dans la toiture, 15 à 25 cm dans le sol.

Les isolants parmi les plus courants sont la laine de verre, la laine de roche, le polyuréthane (PUR), le polyisocyanurate (PIR).

Au même titre qu'une serre, la performance d'une habitation solaire bioclimatique dépend de sa capacité à empêcher que l'énergie qui a été captée et emmagasinée ne s'échappe. En plus de garantir une isolation performante pour les planchers, les murs et toit, un compromis doit être trouvé entre la surface vitrée, le type de fenêtre et les gains solaires. Il s'agit d'un élément important puisque, par temps froid, les fenêtres causent des pertes de chaleur jusqu'à 10 fois plus grandes que celles occasionnées par un mur d'une surface équivalente. Une partie des pertes est causée par les phénomènes de conduction et de convection, mais c'est le rayonnement qui représente les deux tiers des pertes thermiques totales d'une fenêtre ordinaire.

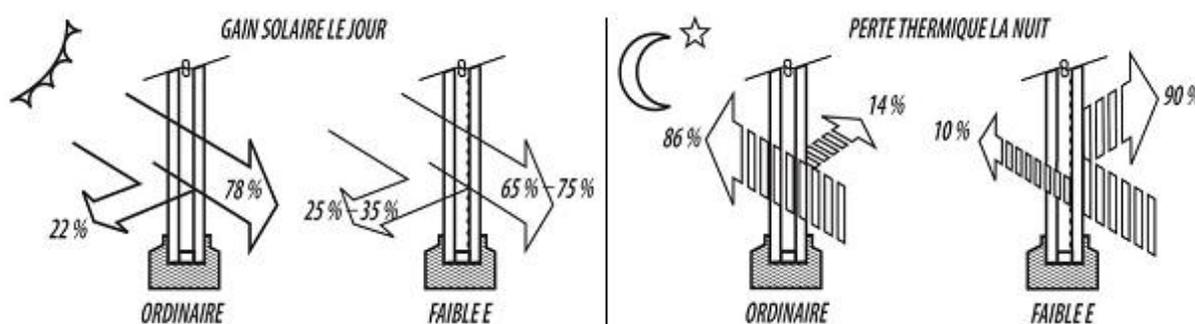


Fig.4.8 : gain solaire et pertes thermiques des fenêtres ordinaires et à faible E [9]

Une fenêtre à triple vitrage réduit le gain solaire de 20% comparativement à une fenêtre à simple vitrage, mais possède un facteur d'isolation supérieur. Les technologies qu'utilisent aujourd'hui les fenêtres ont donc permis d'augmenter de manière significative leur performance.

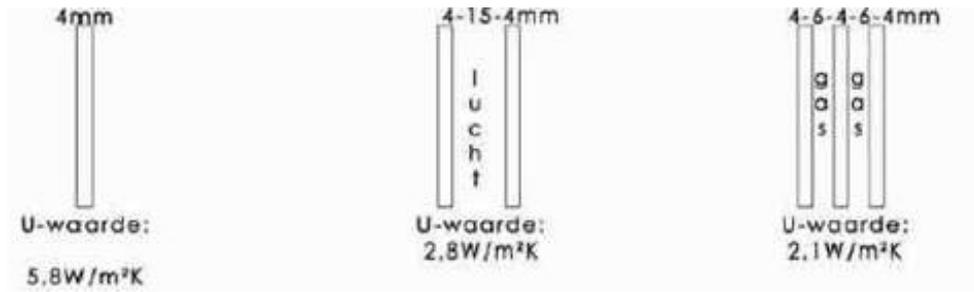


Fig.4.9 : Comparaison des performances de simple, double et triple vitrages [9]



Fig.4.10: exemple d'une maison bioclimatique près de Stavelot [9]

Le bioclimatisme reprend donc un ensemble de recommandations, mais ne formule aucune exigence de performances particulières.

4.4 Maisons « passives »

4.4.1 Introduction

L'idée de « maison passive » est attribuée au Professeur Wolfgang Feist de l'institut Habitat et environnement de Darmstadt (Allemagne). Elle a été élaborée à la fin des années 1980 en collaboration avec le Professeur Bo Adamson de l'université de Lund (Suède). La ville de Darmstadt manifesta son intérêt pour accueillir les premières maisons expérimentales et les 4 premiers logements furent habités en 1991. [9]

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergies renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation.

4.4.2 Apports gratuits

Même si la vocation première d'une maison passive n'est pas de maximaliser les apports d'énergie mais plutôt de minimiser les pertes, il est clair que les apports gratuits internes ou solaires ne sont pas à négliger.

Cependant, contrairement au cas d'une maison bioclimatique, par exemple, où l'orientation au Sud est un facteur déterminant, ce type de conditions n'est pas indispensable pour une maison passive. On peut très bien avoir une maison passive qui soit "mal" orientée.

- Apports solaires passifs

- Orientation

Le soleil intervient pour dispenser lumière et chaleur. Une orientation adaptée aux contraintes du bâtiment permet ainsi de réduire les consommations de chauffage et d'éclairage. La figure 4.11 illustre cet aspect en comparant les besoins annuels de chauffage d'une habitation selon l'orientation et la proportion de ses vitrages (rapport de la surface vitrée à la surface de la façade).

On constate une sensible diminution des besoins de chauffage pour une orientation Sud, alors qu'ils ne cessent d'augmenter pour une orientation Nord. Cette évolution des consommations n'est valable que dans certains cas et dépend de nombreux paramètres tels que le type de vitrage, l'isolation des parois, l'inertie... L'écartement progressif des courbes reflète le bilan thermique de la fenêtre : capteur de la chaleur au sud, elle devient surface déperditrice au nord.

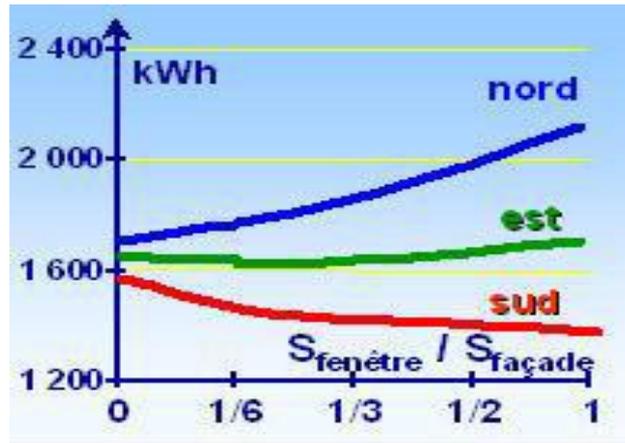


Fig.4.11 : Besoin de chauffage selon la proportion de vitrages. [28]

- Compacité

Dans les climats tempérés, les déperditions thermiques des bâtiments dues aux différences de température entre l'ambiance intérieure (stable) et les conditions extérieures (variables), se font principalement par conduction au droit de l'enveloppe du bâtiment. Il s'ensuit que, pour un même volume, les déperditions seront plus importantes à mesure qu'augmente la surface de l'enveloppe, dite surface déperditive. Ce rapport entre volume et surface déperditive s'appelle compacité. Pour des raisons énergétiques, l'architecte cherche à minimiser la surface de déperdition tout en maximisant le volume habitable, ce qui se traduit par une forte compacité.

- Principes de régulation naturelle en hiver

- Capter : Vitrages performants

Même non occupée et non chauffée, une maison peut atteindre une température intérieure supérieure de plusieurs degrés à la température extérieure. En effet, le soleil irradie les surfaces vitrées à raison de 50 W sur 1 m² de fenêtre (verticale) orientée au nord (rayonnement diffus) et de près de 150 W sur chaque m² de fenêtre plein sud (valeurs moyennes à Uccle, au mois de mars). [21]

Dans le cas d'une maison basse énergie, on se contente aujourd'hui d'un double vitrage basse émissivité ("low-e"), mais dans le cas d'une maison passive, un vitrage plus performant s'avère indispensable : triple vitrage low-e ou double vitrage avec film intercalaire (« Heat-Mirror »).

- Stocker : Inertie

En hiver et en mi-saison, lors d'une journée bien ensoleillée, une forte inertie (courbe rouge sur la figure 4.12 permet d'emmagasiner les apports solaires et de décaler le pic de température intérieure plus tard dans journée, quand la température extérieure sera plus basse. Une faible inertie (courbe verte), par contre, n'amortit que très peu le pic de température intérieure, qu'il ne retarde que de quelques heures seulement. L'inertie thermique agit donc comme une régulation naturelle du climat intérieur.

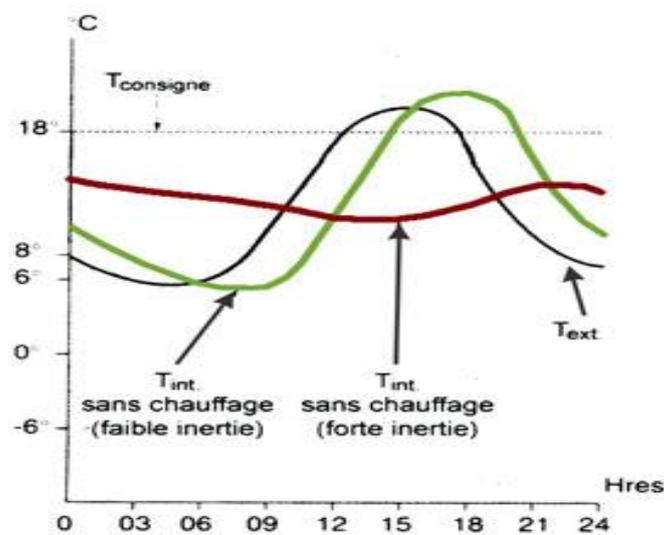


Fig.4.12 : Journée ensoleillée d'hiver. [21]

- Principes de régulation naturelle en été :

- Protéger : Protection solaire mobile ou fixe

En été, la stratégie d'hiver (capter le soleil) doit être inversée : il faut protéger la maison du rayonnement solaire. Les façades d'orientation proche du sud sont les plus faciles à protéger.

Une protection fixe bien dimensionnée (auvent, débord de toiture, etc.) est à même d'éliminer complètement le rayonnement direct d'été sans pour autant porter une ombre indésirable en hiver. Par contre, aucune protection fixe, horizontale ou verticale, ne permet de résoudre efficacement le problème propre aux façades est et ouest, où le soleil est plus bas. Dans ces situations, une protection mobile sera de loin la plus préférable.

La végétation peut constituer un excellent pare-soleil qui ombre en été et laisse passer le rayonnement solaire en hiver (figure 4.13).

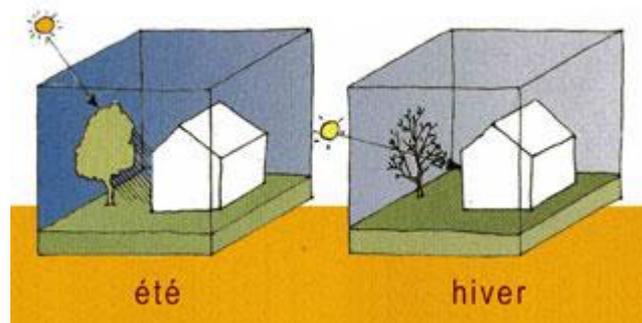


Fig.4.13: Avantage de la végétation en été et en hiver. [21]

- Déphaser : Inertie

En été, les apports de chaleur reçus pendant la journée pourraient conduire à une surchauffe considérable.

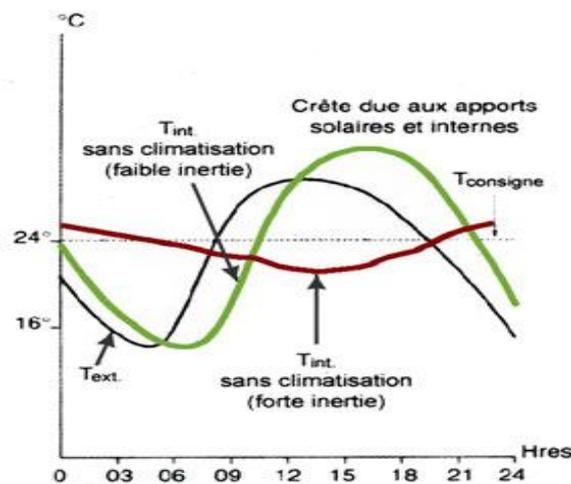


Fig4.14 : Journée ensoleillée d'été.[21]

Une bonne inertie courbe rouge sur la figure 4.14 permet de stocker la chaleur reçue en journée pour la restituer pendant la nuit, lorsque la température extérieure s'est refroidie. Pour les maisons passives l'effet de l'inertie sera moins prononcé.

- Dissiper : Ventilation nocturne

Pour éviter une surchauffe trop importante, la ventilation nocturne est intéressante. Elle permet de dissiper la chaleur qui s'est accumulée pendant la journée : le bâtiment se refroidit la nuit, il se "décharge", pour être prêt à se "recharger" la journée suivante. Sans ventilation, la chaleur stockée de jour en jour rendrait les températures intérieures progressivement inconfortables.

4.4.3 Apports internes

Une partie des apports gratuits en chaleur dans un bâtiment provient de son occupation. Par occupation, on entend l'utilisation de l'éclairage artificiel, de l'eau chaude sanitaire et des appareils électroménagers ainsi que la présence même des occupants.

Ces apports résultent en réalité notamment du fait que l'électricité consommée par les appareils électroménagers et par l'éclairage artificiel est finalement dissipée sous forme de chaleur (incontrôlée) au sein du bâtiment.

Dans une maison passive, l'impact des apports internes est beaucoup plus important que dans une maison conventionnelle. En effet, dans cette dernière, le fait d'allumer un spot ou de cuisiner ne va pas significativement modifier la température intérieure de la maison. Par contre, dans une maison passive, c'est le cas.

4.4.4 Isolation thermique

Dans une maison passive, il n'est pas rare de rencontrer des épaisseurs d'isolation de 30 à 40 cm, parfois plus, pour les murs, le toit et les planchers. D'autre part, les ponts thermiques ne sont absolument pas tolérés.

La perte de chaleur à travers une paroi, un plancher ou un toit est mesurée par son coefficient de transmission thermique U (anciennement dénommé k dans les normes belges) exprimé en W/m^2K . Plus U est petit, meilleure est la performance.

Le U moyen de l'enveloppe du bâtiment doit être inférieur ou égal à 0,15 W/m²K (0,1 W/m²K conseillé) pour respecter les standards de la maison passive. Il est clair qu'un U moyen aussi faible ne peut être obtenu qu'avec des matériaux performants, sous peine d'avoir une beaucoup trop grosse épaisseur d'isolant, comme le rappelle le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Epaisseur des différents matériaux pour U = 0,13 W/m²K.[21]

Matériau	Conductibilité thermique (W/m.K)	Epaisseur en mètre pour U= 0,13W/ (m2.K)
Béton ordinaire	2,100	15,80
Brique	0,800	6,02
Brique aérée	0,400	3,01
Bois résineux	0,130	0,98
Brique isolante	0,110	0,83
Paille	0,055	0,410
Isolant conventionnelle (laine de verre, cellulose, polystyrène.....)	0,040	0,300
Isolant plus performant (mousse polyuréthane.....)	0,025	0,188
Panneau isolant sous vide	0,015	0,113
	0,008	0,060

4.4.5 Points critiques de l'enveloppe

- Fenêtre

De tous les composants de l'enveloppe, la fenêtre est l'élément le plus critique à cause de ses multiples fonctions : outre ses qualités d'isolation, elle doit permettre la vue vers l'extérieur, être ouvrable et pouvoir se fermer parfaitement, et en plus, elle doit aussi capter un maximum d'énergie solaire.

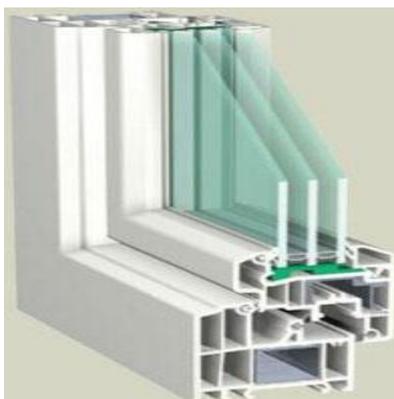


Fig.4.15 : Triple vitrage. [31]

Un coefficient U aussi bas peut seulement être atteint grâce à un triple vitrage. L'espace entre les vitres est rempli de gaz nobles tel que l'argon, afin de réduire le transfert de chaleur par convection. Pour diminuer également le transfert de chaleur par rayonnement, on utilise des verres à faible émissivité (Low-E), c'est-à-dire qu'on leur a ajouté une couche invisible d'oxydes métalliques qui laisse passer la lumière extérieure, mais bloque le rayonnement de chaleur provenant de l'intérieur de la maison.

On peut aussi utiliser un triple ou quadruple vitrage à film, c'est-à-dire que la vitre ou les vitres en position intermédiaire est/sont remplacée(s) par un ou deux film(s) transparent(s) ayant une valeur U adaptée aux standards de la maison passive (figure 4.16). Ce type de vitrage obtient de bonnes performances également avec l'avantage d'être moins épais et moins lourd.

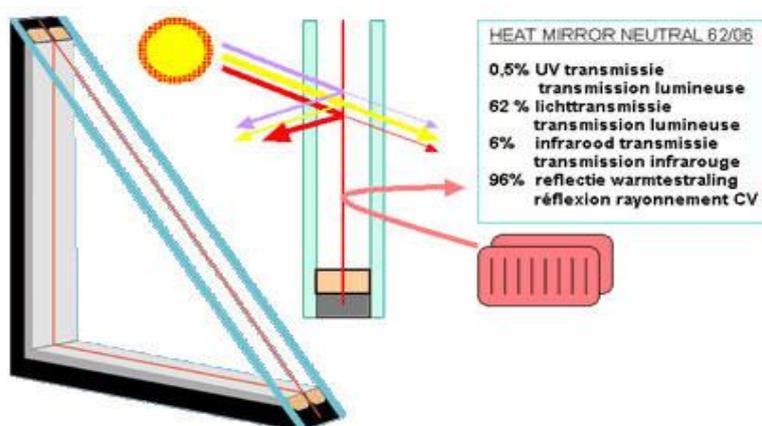


Fig.4.16 : Alternative pour le triple vitrage. [31]

- Ponts thermiques

Les déperditions par les parois sont les principales sources de perte de chaleur dans les maisons passives. Ces pertes sont enregistrées au droit des parois, bien entendu, mais aussi et surtout, aux coins, aux bords, aux jonctions et aux articulations. Les endroits critiques sont typiquement : les seuils, là où un mur intérieur et un mur extérieur sont en contact, là où une dalle de sol touche le mur extérieur, les balcons et linteaux, etc.

L'importance relative des pertes dues aux ponts thermiques augmente en même temps que le niveau d'isolation générale. Dans le cas d'une maison passive, le niveau de performance de l'isolation est très élevé : les ponts thermiques ont donc des conséquences importantes.

Les quatre règles suivantes permettent de réduire le risque de pont thermique :

- Règle de prévention : dans la mesure du possible, ne pas interrompre l'enveloppe thermique ;
- Règle de pénétration : là où une interruption est inévitable, la résistance thermique dans le plan d'isolation doit être aussi haute que possible ;
- Règle d'articulation : aux articulations entre les éléments du bâtiment, les couches d'isolation doivent se rejoindre sans interruption ni décalage ;
- Règle de géométrie : préférer autant que possible les angles obtus ; les angles aigus favorisent en effet la dispersion de la chaleur.

4.4.6 Ventilation

Il pourrait paraître contradictoire d'isoler parfaitement la maison pour ensuite l'aérer "artificiellement". L'isolation thermique et la ventilation sont deux choses bien distinctes et ont des fonctions différentes.

Il est vrai cependant qu'une bonne isolation ne peut être mise en œuvre qu'avec un bon système de ventilation car l'isolation d'un bâtiment, quand elle est bien faite, le rend toujours plus étanche à l'air. Or, si l'air vicié n'est pas évacué et remplacé par de l'air frais, des problèmes d'humidité, de condensation et de moisissures se poseront inmanquablement. Cependant, ceux-ci ne seront pas dus à une isolation excessive, mais à un défaut de ventilation.

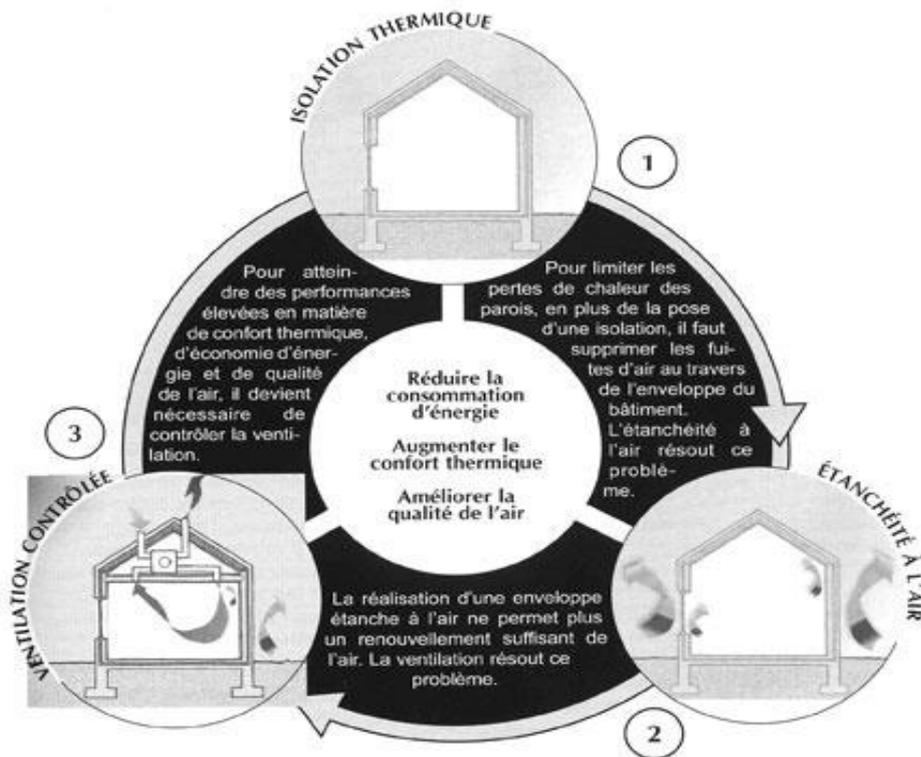


Fig.4.17 : Liens entre isolation, étanchéité à l'air et ventilation. [21]

- Principe général

Pour assurer le renouvellement d'air nécessaire, il faut pouvoir contrôler la ventilation ; de plus une ventilation trop importante constitue aussi une perte d'énergie.

Quatre systèmes sont envisageables :

- A : alimentation et évacuation naturelles;
- B : alimentation mécanique et évacuation naturelle ;
- C : alimentation naturelle et évacuation mécanique ;
- D : alimentation et évacuation mécaniques ("double-flux").

Pour les maisons passives, seul le système D est applicable car c'est le seul à permettre la récupération de la chaleur sur l'air extrait, ce qui constitue une caractéristique indispensable des standards de la maison passive.

La ventilation mécanique contrôlée permet de gérer l'aération du bâtiment quel que soit le temps ou la saison. La quantité d'air, introduite dans le bâtiment est réglée en fonction des besoins, sans consommation d'énergie excessive.

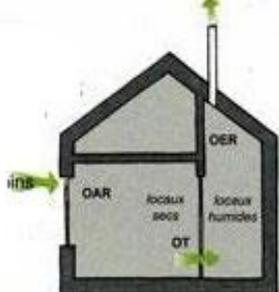
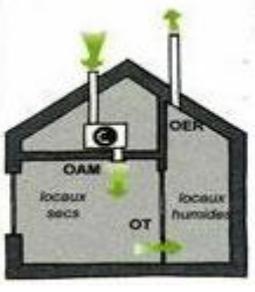
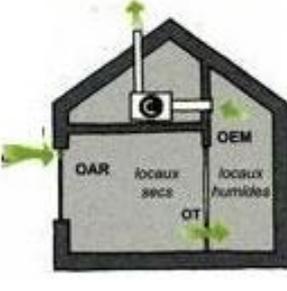
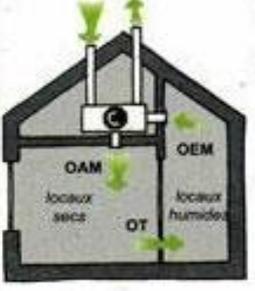
	<p>Alimentation naturelle : l'air neuf arrive naturellement dans les locaux 'secs' par les ouvertures d'alimentation réglable (OAR) installé dans les murs extérieurs.</p>	<p>Alimentation mécanique : un groupe de pulsion ainsi qu'un réseau de conduits pulsent l'air neuf. OAM: ouverture d'alimentation mécanique</p>
<p>Evacuation Naturelle : ce sont des conduits verticaux débouchant en toiture, aussi près que possible du faîte, qui évacuent l'air vicié. OER : ouverture d'évacuation réglable.</p>	<p>A : naturelle.</p> 	<p>B : par insufflation.</p> 
<p>Evacuation mécanique : un groupe d'extraction ou un ventilateur, ainsi qu'un réseau de conduits évacuent l'air vicié. OEM : ouverture d'évacuation mécanique.</p>	<p>C : par extraction.</p> 	<p>D : double flux.</p> 

Fig.4.18: Les quatre systèmes de ventilation. [21]

- Récupération de la chaleur

Un système de récupération de la chaleur à haut rendement (de 75 à 95% de la chaleur est récupérée) est indispensable dans une maison passive. Le système possède alors un échangeur de chaleur entre l'air vicié extrait dans les locaux humides et l'air entrant. Cet échange de chaleur est bien entendu réalisé sans mélange des masses d'air : ce sont les conduites d'entrée et de sortie qui se croisent intimement dans un dispositif appelé "échangeur à plaques" ou "échangeur à contre-courant".

Le système D avec récupération de chaleur est en fait le plus économe en énergie des quatre systèmes de ventilation.

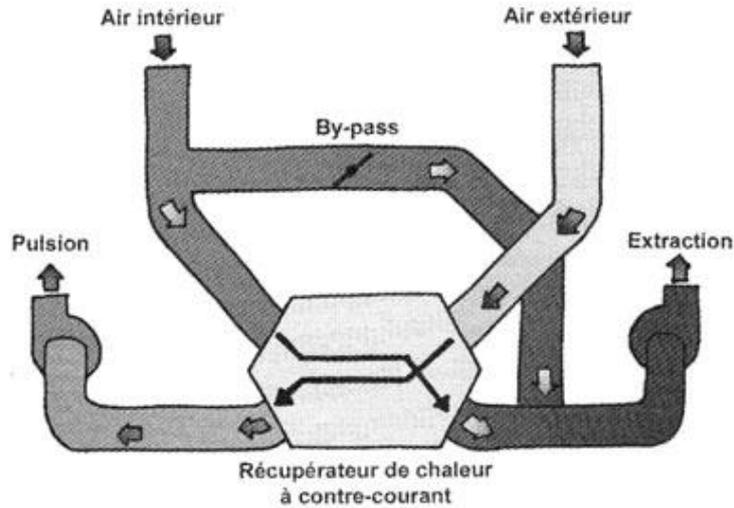


Fig.4.19 : Principe de la ventilation double-flux. [31]

4.4.7 Besoin en énergie

Les besoins en énergie d'une maison passive sont très faibles en raison de son efficacité énergétique. Les systèmes traditionnels de chauffage, largement surdimensionnés, ne conviennent donc pas.



Fig.4.20 : Quartier Kronsberg de Hanovre (Allemagne) [13].

Les critères à respecter sont les suivants :

- Consommation énergie pour le chauffage : max 15 kWh/m².an
- Consommation énergie totale (chauffage, eau chaude, électricité...) : max 42 kWh/m².an
- Consommation d'énergie primaire : max 120 kWh/m².an

Une maison passive nécessite peu de chauffage parce que la chaleur y est piégée à l'intérieur du bâtiment.

4.5 Maisons à basse consommation

Le terme bâtiment « basse énergie » est en général utilisé pour désigner un bâtiment dont les performances énergétiques sont supérieures à celles d'une nouvelle construction ou à celles des exigences légales, et qui aura dès lors une consommation énergétique faible comparée aux bâtiments standards.

Ce concept peut évoluer dans le temps, dès lors que les exigences légales deviennent plus strictes ou que les performances énergétiques des nouvelles constructions tendent à s'améliorer. Par ailleurs, un bâtiment « basse énergie » dans un pays pourrait bien être un bâtiment peu efficace dans un autre dont les exigences en matière de performances énergétiques seraient supérieures.

Les bâtiments « basse énergie » mettent en œuvre des techniques d'isolation et de ventilation efficaces, mais pas aussi poussées que dans le cas du passif.

Souvent en rénovation, la prise en compte du bâti existant, de la préservation du cachet original du bâtiment et des contraintes techniques ne permet pas l'implémentation des mesures permettant d'atteindre les performances du passif, et seule la rénovation basse énergie est possible.

Les constructions « basse énergie » font appel à des techniques plus strictes que celles des constructions conventionnelles, mais moins que celles des maisons passives :

- Isolation importante, double ou triple vitrage,
- Etanchéité de l'enveloppe importante, mais sans obligation d'atteinte de performance spécifique,
- Ponts thermiques évités autant que possible mais tolérés,
- Nécessité d'un système de chauffage conventionnel,
- Maintien de la possibilité de la ventilation naturelle sous certaines conditions (notamment, que l'étanchéité du bâtiment la permette).



Fig.4.21 : exemple maison à basse énergie à Gembloux [9].

4.6 Maisons « zéro énergie »

La maison « zéro énergie » ou « zéro net » est une maison énergétiquement suffisante. Elle produit elle-même la totalité d'énergie dont elle a besoin.

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul. [13]

Une distinction doit être apportée entre le concept de maison énergétiquement « suffisante » et celui de maison énergétiquement « autonome » ou « indépendante ».

En effet la maison énergétiquement « suffisante » produira sur une année complète, une quantité d'énergie équivalente à la quantité d'énergie consommée. Cela ne signifie cependant pas qu'elle peut se passer du réseau électrique, car elle ne consommera pas nécessairement l'énergie dont elle a besoin au moment où elle la produit. Dans la pratique, ce seront souvent des panneaux solaires photovoltaïques, éventuellement complétés par une petite éolienne, qui produiront de l'électricité durant les périodes ensoleillées et/ ou venteuses. D'autres sources d'énergie renouvelable peuvent néanmoins être utilisées.

La maison sera dès lors globalement excédentaire (elle sera fournisseuse nette d'énergie sur le réseau) durant l'été, lorsque les panneaux photovoltaïques produiront de l'électricité à leur rendement optimal.

Durant l'hiver, les panneaux photovoltaïques ne pourront pas compenser la consommation plus importante de l'habitat, et ce dernier sera dès lors importateur net d'énergie.

Dans l'ensemble cependant, la production excédentaire en été compensera le manque en hiver, de telle sorte que le bilan total sur l'année sera nul.

La maison « totalement autonome », quand à elle, n'est pas connectée au réseau électrique. Cela peut être le cas de maisons fortement isolées (éloignée du réseau) et dont le coût de raccordement au réseau prohibitif.

Afin de pouvoir bénéficier d'électricité durant la nuit ou lorsque les panneaux ne peuvent fournir autant que les besoins le nécessitent, l'énergie doit être stockée dans des batteries.

Les maisons à zéro énergie se chauffent en général par des panneaux solaires thermiques, avec l'appoint fourni par une pompe à chaleur alimentée en électricité.

Le principe de la maison à énergie zéro est donc complètement différent de celui de la maison passive, puisqu'il consiste en une compensation de la consommation totale, quelle qu'elle soit, et non en une optimisation des conditions favorisant la sobriété énergétique de la maison.



Fig.4.22: La maison ZEN [13]

4.7 Maisons à énergie positive

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau « zéro énergie » : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa consommation électrique.

Pratiquement, il peut s'agir de maisons passives pourvues de suffisamment de sources d'énergies renouvelables, ou de maisons ne répondant pas spécialement aux critères passifs, tous comme les maisons à zéro énergie, mais présentant malgré tout un surplus de production énergétique global.

Ces maisons sont donc des mini-centrales électriques insérées dans un réseau décentralisé, et sont fournisseuses nettes d'énergie à ce réseau, en moyenne sur une année complète.



Fig.4.23: exemple des bâtiments à énergie positive à Freiburg en Allemagne [9]

4.8 Conclusion

Les différents concepts de bâtiments performants décrits dans ce chapitre convergent autour de quelques critères simples visant à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, à la valorisation des ressources énergétiques locales et à l'intégration des préoccupations environnementales.

Dans cet ensemble, le « bâtiment passif » représente un bon niveau de performance qui s'appuie sur une conception bioclimatique. Ce concept peut être atteint uniquement par l'optimisation de l'isolation (murs, fenêtres, porte etc.), accroissement des apports solaires passifs et internes. Aussi par la réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base énergies renouvelables.

5.1 Introduction

Après avoir décrit dans le chapitre précédent les caractéristiques d'une habitation à haute performance énergétique, dans ce dernier chapitre, nous allons étudier les performances énergétiques d'une habitation située dans la wilaya de Chlef.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première partie, nous présentons d'abord brièvement le site de Chlef et l'habitation étudiée. Ensuite, nous définissons la consommation électrique journalière et enfin le dimensionnement du système PV qui doit répondre aux besoins énergétiques de notre habitation.

La deuxième partie s'intéresse à l'étude du bilan thermique de l'habitation. Dans un premier lieu, nous effectuons une première simulation pour déterminer les besoins énergétiques nécessaires au chauffage et à la climatisation de l'habitation étudiée. En deuxième lieu, et dans le souci de réduire au maximum les besoins énergétiques, et atteindre le niveau de performance énergétique d'une habitation économique, nous proposons un ensemble de solutions telles que l'utilisation des isolants et des vitrages à haute performances énergétiques.

5.2 Caractéristiques géographiques du site

Située dans la région nord-ouest de l'Algérie, à 208 km de la capitale Alger, à une latitude 36.13° , une longitude de 1.20° et une altitude de 133m, Chlef s'étend sur une superficie de 4.791 Km² et montre un grand intérêt géographique.

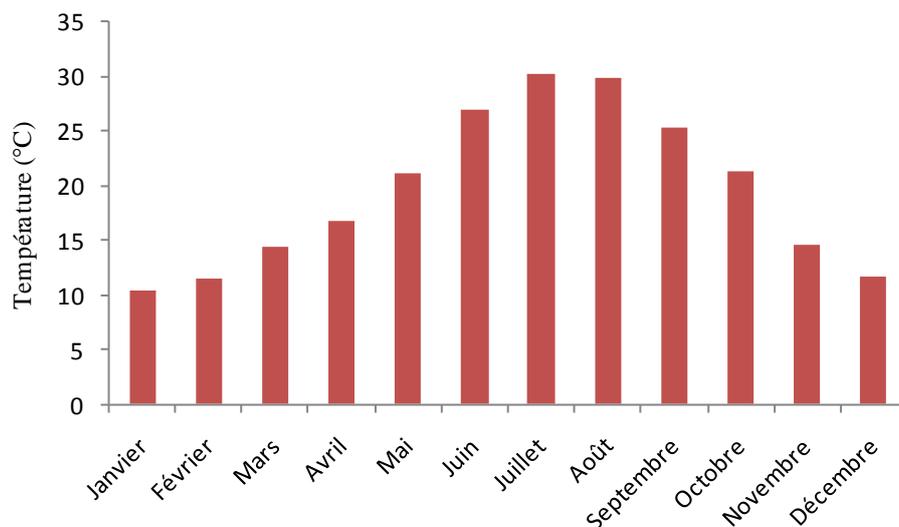


Fig. 5.1 : Variation de la température en fonction du temps de la région de Chlef.

Située dans une cuvette séparée de la mer par les monts du Dahra. Malgré son climat sub-humide, Chlef est une des régions les plus chaudes d'Algérie.

La figure 5.1 représente la variation de la température moyenne du site de Chlef en fonction du temps.

5.3 Description de l'habitation étudiée

L'habitation choisie pour faire l'objet de notre étude est une habitation de type individuelle d'une citée implantée dans la Wilaya de Chlef.

Actuellement occupée par une famille constituée d'un couple et quatre enfants, le logement étudié est un logement représentatif d'une famille moyenne algérienne, tant par son type que par son niveau d'équipement, notamment en appareillage électrique. Cet aspect a grandement contribué dans le choix effectué.

5.4 Consommations énergétiques de l'habitation

L'habitation est raccordée aux réseaux d'électricité, d'eau et de gaz.

La consommation annuelle est calculée sur la base des relevés d'électricité et de gaz facturés par la société nationale d'électricité et du gaz. Pour cette habitation, la consommation en énergie électrique, cumulée pour l'année 2008 a été de 1360 kWh. Tandis que la consommation en gaz, exprimée en kWh, est de 11335.52 kWh (1 thermie = 1.16 kWh). Sur les figures 5.2 et 5.3 sont représentées les répartitions trimestrielles de la consommation en électricité et en gaz respectivement pour l'année 2008.

Tableau 5.1 : Bilan de la consommation énergétique de l'habitation étudiée, année 2008.

Période	Janvier-Mars	Avril-Juin	Juillet- Septembre	Octobre- Décembre
Electricité (kWh)	297	421	352	290
Gaz (kWh)	3452	1982	2450	3452

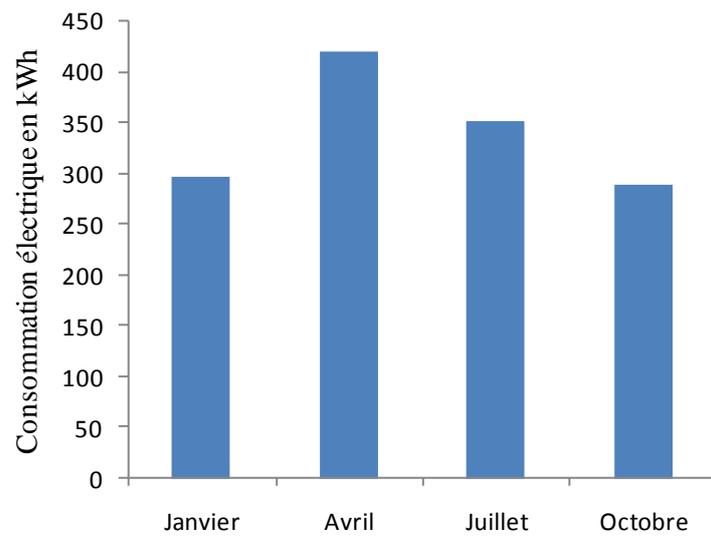


Fig.5.2 : Bilan de la consommation électrique (kWh) 2008 de l'habitation étudiée

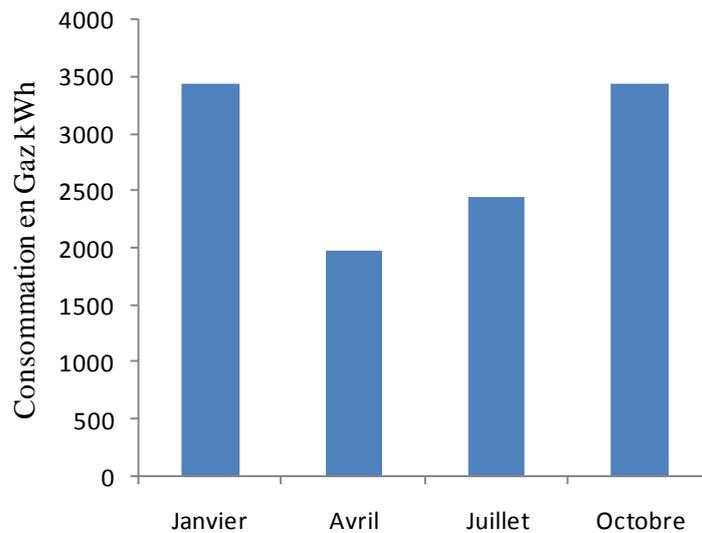


Fig.5.3 : Bilan de la consommation Gaz (kWh) 2008 de l'habitation étudiée.

Nous constatons que pour les périodes de chauffage, janvier-mars et octobre-décembre, la consommation en gaz est très élevée, soit en moyenne de 3452kWh par trimestre. Tandis que sur la période estivale, celle-ci est inférieure 2216kWh. Elle est destinée essentiellement à la cuisson et l'eau chaude sanitaire.

Concernant les périodes de climatisation, Avril-juin et juillet-septembre, la consommation en électricité est importante. Tandis que pour le période hivernale, elle est un peu moins élevée en comparaisant à la période estivale.

5.5 Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée par deux critères essentiels qui sont gisement solaire et la demande de l'énergie. Cette gestion d'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle utilisés.

5.5.1 Ensoleillement

La source d'énergie de notre système étant le solaire, il est important d'apporter un soin particulier au profil d'ensoleillement.

Le tableau 5.2 représente la durée d'ensoleillement moyenne du site de Chlef. Ces données sont fournies par la station météo de Chlef.

Tableau 5.2 : Durée d'ensoleillement du site de Chlef.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Durée (h/j)	5.58	6.62	7.23	8.55	8.98	10.98
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Durée (h/j)	11.05	10.33	8.58	7.43	5.88	5.12

5.5.2 Etude du profil de consommation électrique

Nous proposons d'estimer la consommation électrique journalière d'une habitation de 110 m² de superficie, située dans la wilaya de Chlef.

Cette maison se compose de deux chambres, un salon, une cuisine, un couloir, une salle de bain et un WC et habitée par une famille de 6 personnes.

Le tableau 5.3 présente le nombre et le type des charges et leurs consommations électriques (1^{er} cas).

Tableau 5.3 : consommations électriques de l'habitation par type de charges.

Eléments	Equipements	Puissance (W)	Nombre	Heures de fonctionnement	Consommation électrique
Salon	L1 : Lampe	75	1	4	300
	E1 : Téléviseur	75	1	7	525
	E2 : Démo SAT	40	1	7	280
	E3 : Ventilateur	45	1	4	180
Chambre 1	L2 : Lampe	75	1	5	375
	E4 : fer à repasser	1200	1	1/2	600
Chambre 2	L3 : Lampe	75	1	5	375
	E5 : Ordinateur	200	1	1	200
Cuisine	L4 : Lampe	75	2	4	600
	E6 : Machine à laver	1500	1	1/2	750
	E7 : Frigo	100	1	13	1300
	E8 : Radio	30	1	1	30
Salle de bain	L5 : Lampe	75	1	2	150
WC	L6 : Lampe	75	1	1	75
Couloire	L7 : Lampe	75	1	4	300
				Total	6040Wh/j

Nous constatons que la consommation électrique journalière de cette habitation est très élevée, environ 6.04KWh/j.

Pour réduire la consommation électrique, on propose les solutions suivantes :

- Remplacer les lampes électriques à incandescence traditionnelle de 75W par des lampes à basse consommation de 15W (qui consomment 5 fois moins d'énergie et qui durent 10 fois plus longtemps).

- Le réfrigérateur parmi les appareils ménagers les plus gourmands en électricité. Remplacer le frigo classique de 100W par un frigo efficace de 40W (ex : condor RMC 350).
- Remplacer le téléviseur 75W par un téléviseur de 55W (ex : condor Lcd Série V68).

5.5.3 Proposition d'un profile de consommation énergétique

Le tableau 5.4 présente le nombre et le type des charges et leurs nouvelles consommations électriques (2^{ème} cas).

Tableau 5.4 : Nouvelles consommations électriques de l'habitation par types de charges.

Eléments	Equipements	Puissance (W)	Nombre	Heures de fonctionnement	Consommation électrique
Salon	L1 : Lampe	15	1	4	60
	E1 : Téléviseur	55	1	7	385
	E2 : Démo SAT	40	1	7	280
	E3 : Ventilateur	45	1	4	180
Chambre 1	L2 : Lampe	15	1	5	75
	E4 : Fer à repasser	800	1	1/2	400
Chambre 2	L3 : Lampe	15	1	5	75
	E5 : Ordinateur	200	1	1	200
Cuisine	L4 : Lampe	15	2	4	120
	E6 : Machine à laver	1000	1	1/2	500
	E7 : Frigo	40	1	13	520
	E8 : Radio	30	1	1	30
Salle de bain	L5 : Lampe	15	1	2	30
WC	L6 : Lampe	15	1	1	15
Couloire	L7 : Lampe	15	1	4	60
				Total	2930 Wh/j

Nous constatons que les solutions proposées sont efficaces, elles permettent de réduire la consommation journalière de l'habitation jusqu'à 2,930 KWh/j avec un gain d'énergie de 3,110 KWh/j.

La consommation peut être également réduite par le changement du comportement des membres de la famille. On peut donc réaliser des économies d'énergie en adoptant les bons gestes sans réduire le confort et la qualité de vie.

- Couper les veilles de tous les appareils et utilisez des multiprises équipées d'un interrupteur, ne laissez surtout pas vos appareils branchés toute la journée !
- Débranchez votre chargeur d'appareils photos, portables... dès qu'ils sont chargés.
- Choisissez vos appareils électroménagers avec l'étiquette énergie la plus performante (on peut aller jusqu'à diviser par 3 ou plus la consommation d'électricité en fonction des appareils achetés).
- Placez vos équipements de froid loin des sources de chaleur.
- Evitez de laver votre linge à très haute température, choisissez les programmes de lavage économiques, et faites-le sécher à l'air libre.

5.5.4 Répartition de la consommation électrique dans le foyer

La répartition de la consommation électrique de la maison étudiée est représentée par le tableau 5.5 et les figures 5.4 et 5.5.

Tableau 5.5 : Répartition de la consommation électrique.

Type	Consommation	
	<i>1^{er} cas</i>	<i>2^{ème} cas</i>
Eclairage	2175	435
Lave-linge	750	500
Téléviseur	805	665
Réfrigérateur	1300	520
Climatisation	180	180
Audio-visuel	230	230
Autres	600	400

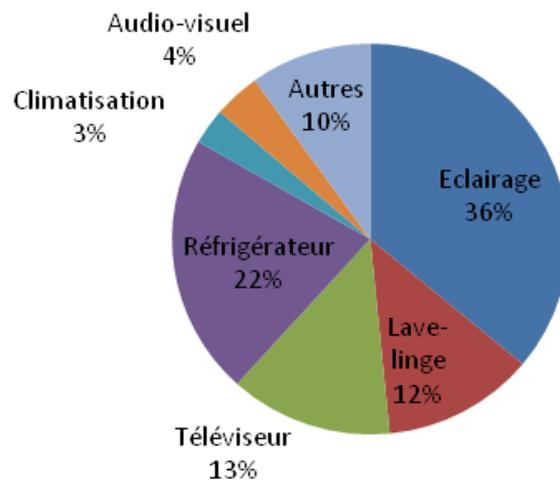


Fig. 5.4: Répartition de la consommation électrique (1^{er} cas)

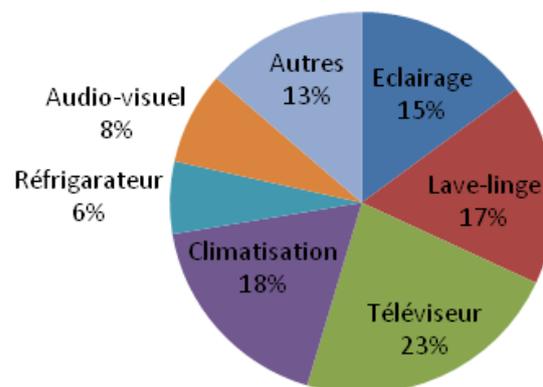


Fig. 5.5 : Répartition de la consommation électrique (2^{ème} cas).

Nous pouvons remarquer que dans le premier cas, l'éclairage constitue plus de 35% de la consommation d'électricité. Tandis que dans le deuxième cas ne représente que 15% de la consommation électrique du foyer. Donc, l'utilisation des lampes à basse consommation joue un rôle très important dans l'économie de l'énergie électrique.

Aussi, le choix des appareils électroménagers performants peut réduire considérablement la consommation d'énergie électrique du foyer.

5.5.5 Caractéristiques du système PV connecté au réseau

Le choix du module PV et le type de l'onduleur du système étant choisis au (chapitre 3) et les besoins en énergie électrique au paragraphe précédent, comme convenu nous avons choisi d'imposer la tension du bus continu à une valeur de 125V. Nous pouvons récapituler dans le tableau 5.6 les caractéristiques de notre système photovoltaïque.

Tableau 5.6 : Caractéristiques du système PV.

Paramètres	Valeurs
Besoins énergétiques journaliers, E_{AC} [Wh/j]	2930
Durée d'ensoleillement quotidienne du mois le plus défavorable [h]	5.12
Tension du bus continu [V]	125
Rendement électrique du convertisseur [%]	97
Puissance optimal crête du module PV [W]	110
Tension optimale du module [17]	17

5.5.6 Dimensionnement du champ PV

- Calcul de l'énergie électrique totale journalière

Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation électrique, évaluées à 2930 Wh. L'énergie électrique totale journalière, E_T est donnée par l'équation 5.1 suivante :

$$E_T = \frac{E_{AC}}{\eta_{ond}} \quad (5.1)$$

En utilisant la valeur de E_{AC} du tableau 5.6 et la valeur du rendement l'onduleur (Annexe2), l'énergie électrique totale journalière est égale à 3, 02 kWh/j.

- Calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque nécessaire

Le dimensionnement du générateur PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_C = \frac{E_T}{\text{durée d'insolation} \times 0.77} \quad (5.2)$$

D'après le Tableau 5.2, le mois le plus défavorable est : le mois de décembre où la durée d'insolation est : 5.12 heures.

Donc, ces équipements demandent une puissance de 766W et une consommation de 3020 Wh/j.

- Nombre nécessaire des modules solaires constituant le champ photovoltaïque

- Nombre total des modules :

$$N_t = \frac{P_c}{P_m} \quad (5.3)$$

Le nombre de module nécessaire pour satisfaire la demande de l'habitation est : 8 modules

- Nombre de modules en série

Pour avoir une tension suffisante pour alimenter l'onduleur, nous avons besoin de 4 modules en série. ($N_s=4$ modules)

- Nombre de modules en parallèle

$$N_p = \frac{N_t}{N_s} \quad (5.4)$$

Le nombre de modules en parallèle est 2 modules.

- Calcul de la surface occupée par le champ PV

Le générateur PV est installé sur le toit de la maison. Celui-ci possède une aire constante. Il est donc nécessaire de déterminer l'aire totale des modules constituant notre panneau PV.

La figure 5.6 fait apparaître les dimensions d'un générateur PV. Soit un générateur de longueur L et de largeur l , installé avec une pente d'angle θ_p avec l'horizontale.

Son empreinte au sol (autrement dit la surface que le générateur occupe au sol) va déterminer les dimensions occupées par le générateur PV, comme présenté dans la figure 5.6.

La longueur et la largeur du générateur PV sont calculées respectivement par les formules 5.5 et 5.6 :

$$L = L_m \times N_s \quad (5.5)$$

$$l = l_m \times N_p \quad (5.6)$$

Avec : ($L_m = 1.424 \text{ m}$) et ($l_m = 0.655 \text{ m}$) sont respectivement la longueur et la largeur du module PV. (Voire annexe 1)

La figure 5.6 schématise la disposition du panneau PV sur le toit de la maison, L_p correspondant à la largeur du champ incliné.

L_p est calculé en fonction de l'angle d'inclinaison du panneau.

$$L_p = L \times \cos \theta_p \quad (5.7)$$

Dans notre cas, l'angle d'inclinaison est de 30° , la hauteur du générateur incliné pour un module d'une longueur de 1.424 m est de largeur de 4.922 m .

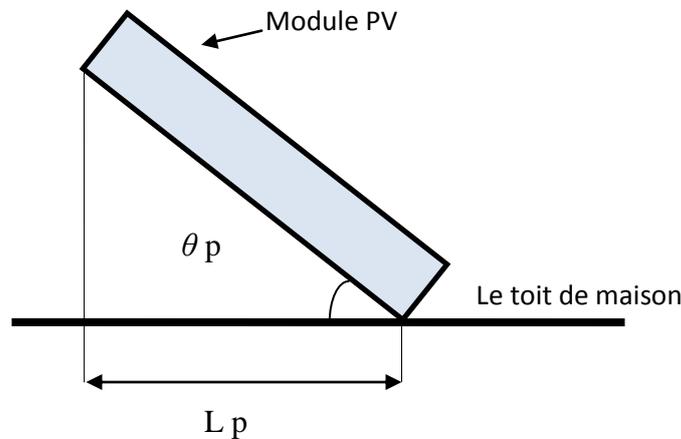


Fig. 5.6 : Schéma de disposition d'un générateur PV sur le toit.

La surface totale S_p occupée par le champ photovoltaïque est calculée en fonction de la largeur du panneau PV :

$$S_p = l \cdot L_p \quad (5.8)$$

Donc, la surface occupée par le générateur solaire PV alimentant la maison est de 6,44 m².

La surface occupée par le panneau solaire peut être exploitée comme un abri du soleil en été.

Les 8 modules sont répartis selon 2 rangées parallèles de 4 modules en série figure 5.7.

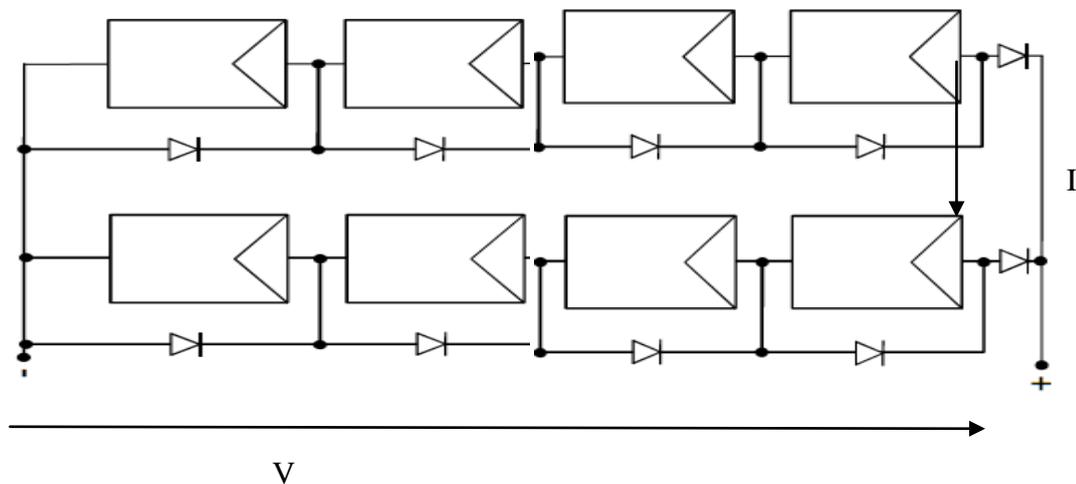


Fig. 5.7 : Générateur solaire photovoltaïque de l'habitation étudiée.

Donc, nous avons pour un banc de 8 modules, le courant, la tension et la puissance délivrés par le générateur PV sont données respectivement par les équations :

$$I = 2 \times I_{module} \quad (5.9)$$

$$V = 4 \times V_{module} \quad (5.10)$$

$$P = 8 \times I \times V \quad (5.11)$$

5.6 Simulation des performances électriques

Dans notre cas, le calcul des performances électriques est basé sur la simulation numérique à l'aide du logiciel MOHER qui est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybride.

5.6.1 Etapes de simulation

Pour calculer le taux de contribution de l'énergie photovoltaïque dans l'alimentation de la maison en électricité, nous avons passé par les étapes suivantes :

1^{ère} étape : introduire les composants du système PV

Dans notre cas, le système PV est composé d'un générateur PV connecté au réseau électrique et un convertisseur de courant et les charges.

2^{ème} étape : introduire les détails de la charge.

La charge introduite dans le logiciel correspond à la demande en électricité auquel le système doit répondre.

Le tableau 1 représente les consommations horaires de la maison pour la période chaude qui s'étend d'Avril à Novembre et la période froide qui s'étend d'Octobre à Mars.

Nomenclature :

F : réfrigérateur

TV : téléviseur

ML : machine à laver

DM : démos SAT

VL : ventilateur

FR : ferre à repasser

SL : éclairage salon

C1 : éclairage chambre 1

C2 : éclairage chambre 2

WC : éclairage toilette

SB : éclairage salle de bain

CZ : éclairage cuisine

Tableau 1: Consommation horaire de la maison étudiée.

	Semestre 1 : Oct -Nov- Déc- Jan- Fev- Mar		Semester 2: Avr-Mai- Juin- Juil-Aout- Sept	
Heure	Charge active	Consommation (kW)	Charge active	Consommation (kW)
1	F	0,020	F	0,020
2	F	0,020	F	0,020
3	F	0,020	F	0,020
4	F	0,020	F	0,020
5	F	0,020	F	0,020
6	F+WC+SB+CZ+C1	0,100	F+WC+SB+CZ+C1	0,080
7	F+WC+SB+CZ+C1+C2	0,095	F+WC+SB+CZ+C1+C2	0,095
8	F+FR+TV+DM	0,615	F+FR+TV+DM	0,615
9	F+TV+DM	0,095	F+TV+DM	0,115
10	F+ML	0,520	F+ML	0,520
11	F+R	0,060	F+R	0,060
12	F+R	0,060	F+R+VL	0,105
13	F+TV+DM	0,115	F+TV+DM+VL	0,160
14	F+TV+DM	0,115	F+TV+DM+VL	0,160
15	F	0,020	F+TV+DM	0,115
16	F	0,020	F	0,020
17	F+TV+DM	0,095	F	0,020
18	F+TV+CZ+DM+PC	0,330	F+TV+DM+PC	0,315
19	F+TV+SL+CZ+C1+DM	0,160	F+TV+CZ+DM	0,125
20	F+TV+SL+CZ+C1+C2		F+TV+SL+CZ+DM+C1	0,160
	+DM	0,197	F+TV+SL+DM+CZ+C1	
21	F+TV+SL+DM+C1+C2+		+C2	0,175
	SB+WC	0,110	F+TV+SL+DM+C1+C2	
22	F+TV+SL+DM	0,130	+SB+WC	0,154
23	F	0,020	F+TV+SL+DM+VL	0,175
24	F	0,020	F	0,020
	Énergie totale (kWh/j)	2,977	Énergie totale (kWh/j)	3,289

3^{ème} étape : introduire les détails des composants ;

Les détails des composants décrivent les options technologiques, les coûts, la taille et le nombre de chaque composant que HOMER va utiliser dans ses simulations.

Les puissances qui seront utilisées pour les simulations doit calculées et introduites dans le logiciel HOMER.

L'énergie électrique totale journalière peut être calculée par la formule suivante.

$$E_T = \frac{E_{AC}}{\eta_{ond}}$$

$$E_T = \frac{3.1}{0.97} = 3.19 \text{ kWh/j}$$

La puissance crête du générateur photovoltaïque , correspondant à chaque angle d'inclinaison, peut être calculée par la formule suivante.

$$P_C = \frac{E_T}{G \times f} ; f= 0.65 : 0.9$$

G : irradiation globale sur un plan incliné (kWh/m²). Pour chaque angle, on prend l'irradiation maximale. (tableau)

$$P_C = \frac{3.19}{6.8 \times 0.8} = 0.586 \text{ W} ; \text{ pour l'angle } 20^\circ , G = 6.8 \text{ kWh/m}^2$$

$$P_C = \frac{3.19}{6.68 \times 0.8} = 0.596 \text{ W} ; \text{ pour l'angle } 25^\circ , G = 6.68 \text{ kWh/m}^2$$

$$P_C = \frac{3.19}{6.52 \times 0.8} = 0.611 \text{ W} ; \text{ pour l'angle } 30^\circ , G = 6.52 \text{ kWh/m}^2$$

$$P_C = \frac{3.19}{6.33 \times 0.8} = 0.629 \text{ W} ; \text{ pour l'angle } 35^\circ , G = 6.33 \text{ kWh/m}^2$$

$$P_C = \frac{3.19}{6.10 \times 0.8} = 0.653 \text{ W} ; \text{ pour l'angle } 40^\circ , G = 6.10 \text{ kWh/m}^2$$

4^{ème} étape : introduire les détails des ressources.

Le rayonnement global journalier correspondant à chaque angle d'inclinaison est représenté dans le tableau .

Tableau 2 : Mesure du rayonnement global journalier de la ville de Chlef.

Mois	Hh	H(20°)	H(25°)	H(30°)	H(35°)	H(40°)
Janvier	2450	3380	3750	3740	3880	4000
Février	3250	4130	4300	4440	4550	4640
Mars	4230	4860	4960	5020	5060	5070
Avril	5460	5780	5780	5750	5690	5590
Mai	6440	6410	6320	6200	6040	5850
Juin	6930	6710	6570	6390	6180	5940
Juillet	6930	6800	6680	6520	6330	6100
Août	6180	6400	6370	6300	6190	6050
Sptembre	4940	5550	5630	5670	5680	5650
Octobre	3860	4780	4940	5070	5180	5250
Novembre	2590	3480	3660	3810	3940	4050
Décembre	2140	3030	3210	3380	3520	3640

Hh: Irradiation sur un plan horizontal [Wh/m^2].

H: Irradiation selon l'angle d'inclinaison [Wh/m^2].

5^{ème} étape : Examiner les résultats d'optimisation

Une fois le calcul terminé , les configurations possibles sont classés en fonction du coût, voir figure 2. Ainsi, nous pouvons choisir la meilleure configuration.

L'objectif est de rechercher quelle est l'inclinaison qui permettra de produire le plus d'énergie sur l'année. Ainsi, le calcul est répété pour divers angles d'inclinaison de 20 à 40 degré.

D'après la figure 1, le maximum de production du GPV est obtenu à 35 °.

Donc, notre générateur PV doit être orienté plein sud, avec un angle d'inclinaison de 35°.

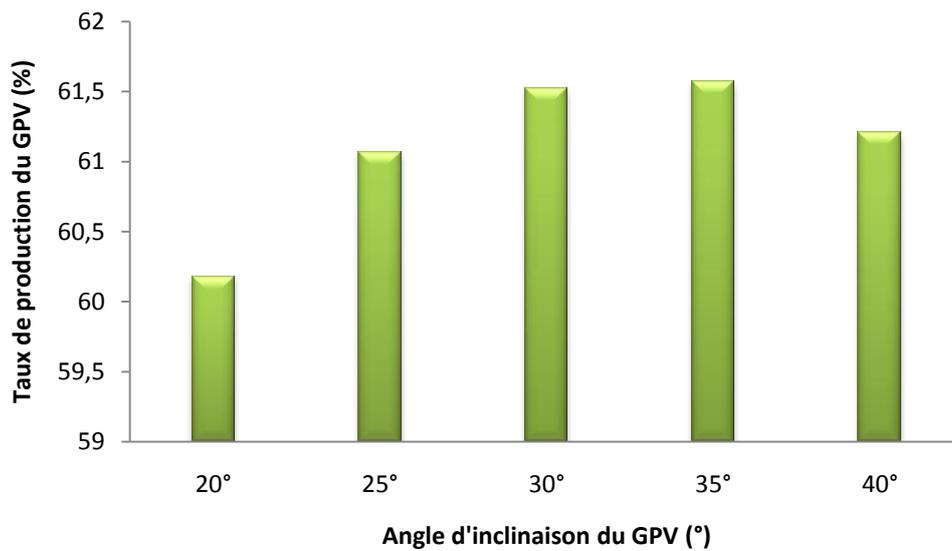


Figure 1 : taux de production PV en fonction d'angle d'inclinaison

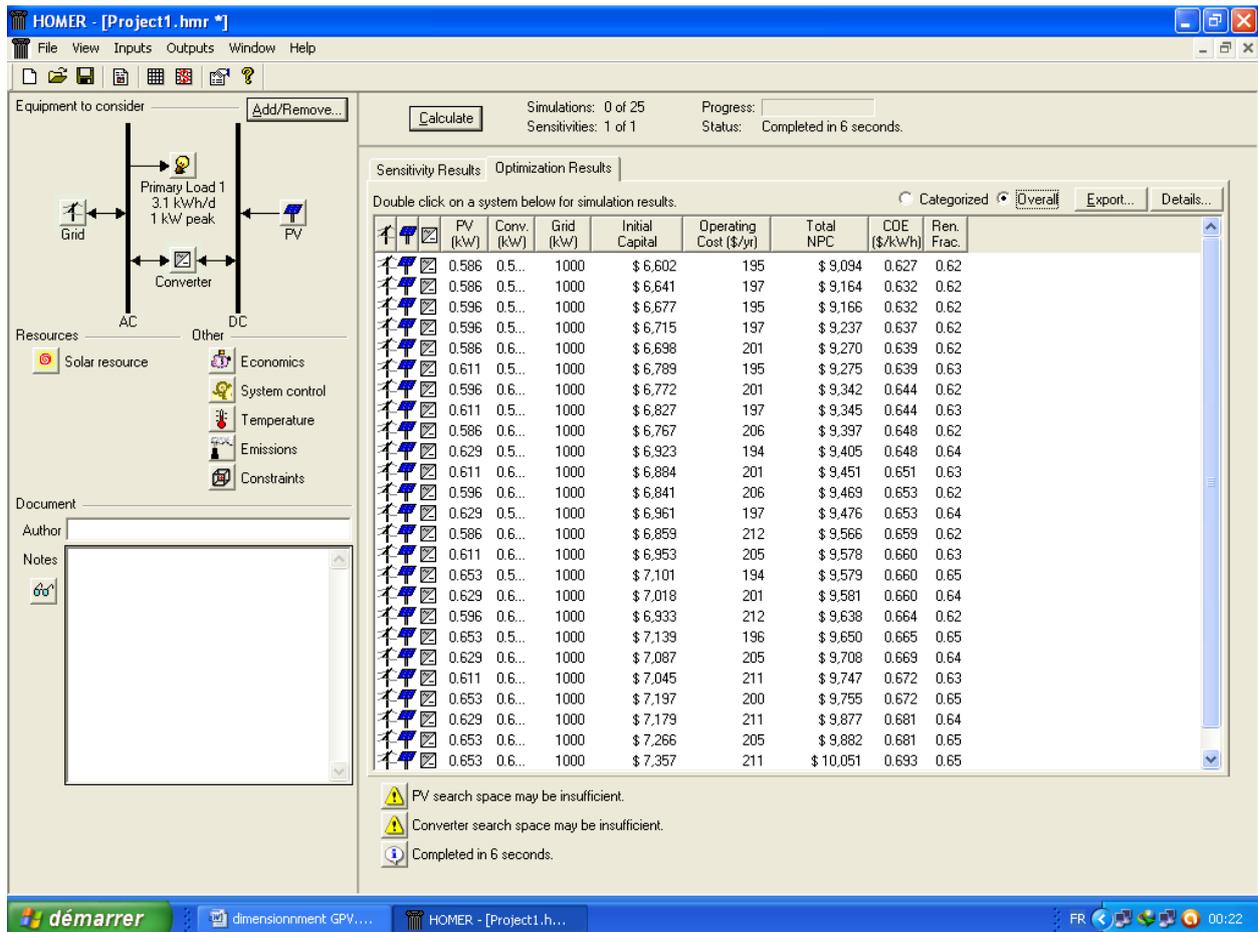


Figure 2: fenêtre des résultats de simulation.

5.6.2 Production d'électricité

Les quantités d'énergie électrique annuelles produites par le générateur PV, le réseau et totale sont représentées par la figure 3.

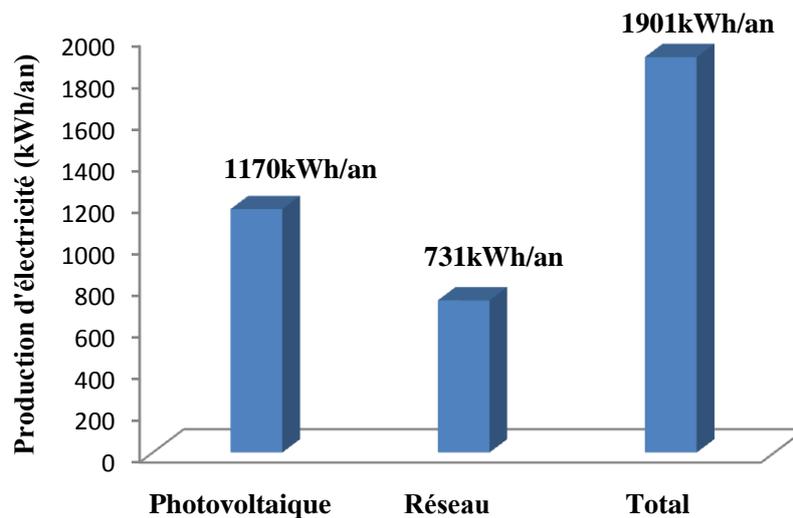


Figure 3 : Production d'énergie électrique annuelle.

La quantité d'énergie électrique annuelle produite par le générateur PV est de 1170 kWh, avec un taux annuel de production PV de 62% (61,6%).

La quantité d'énergie électrique annuelle achetée du réseau électrique est de 731 kWh, avec un taux annuel de production de 38%.

5.6.3 Consommation d'électricité

Les quantités d'énergie électrique consommées par les charges PV, le réseau et totale sont représentées par la figure 4.

La quantité d'énergie annuelle consommée par les charges de la maison est de 1135 kWh, avec un taux annuel de 64%.

La quantité d'énergie annuelle injectée dans le réseau électrique (vendue) est de 648 kWh, avec un taux de 36%.

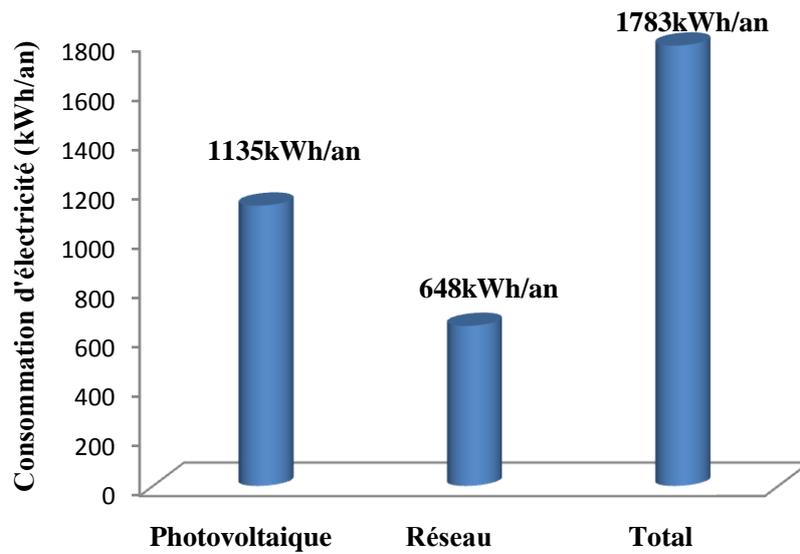


Figure 4 : Consommation d'énergie électrique annuelle.

5.6.4 Energie électrique achetée du réseau

L'énergie électrique achetée du réseau électrique en fonction des mois de l'année est représentée par la figure 5.

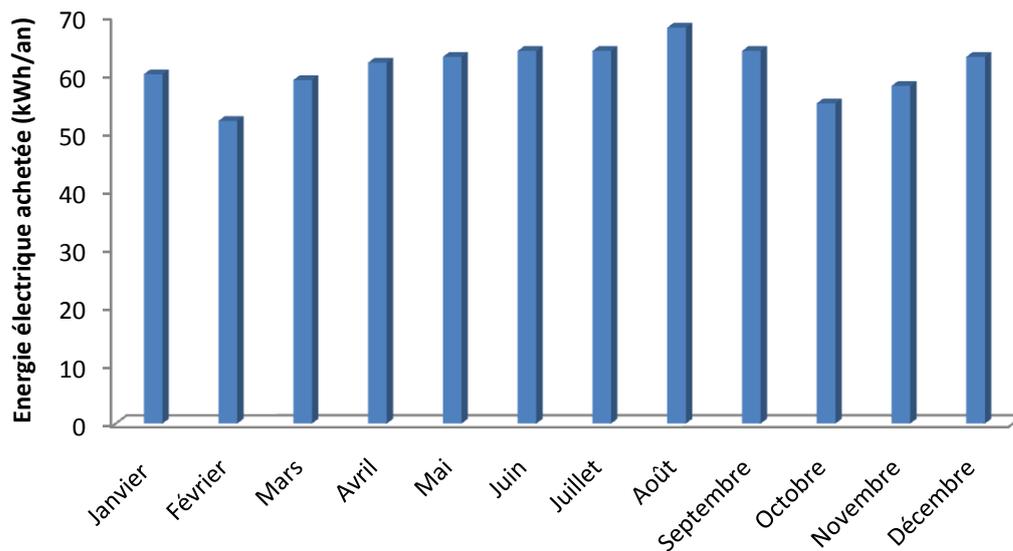


Figure 5: Energie électrique achetée en fonction des mois.

L'énergie électrique achetée du réseau électrique varie de 52 kWh à 68kWh. Le maximum est enregistré au mois d'août et le minimum au mois d'octobre. L'énergie électrique totale achetée est de 731kWh.

5.6.5 Energie électrique vendue au réseau

L'énergie électrique vendue au réseau électrique en fonction des mois de l'année est représentée par la figure 6.

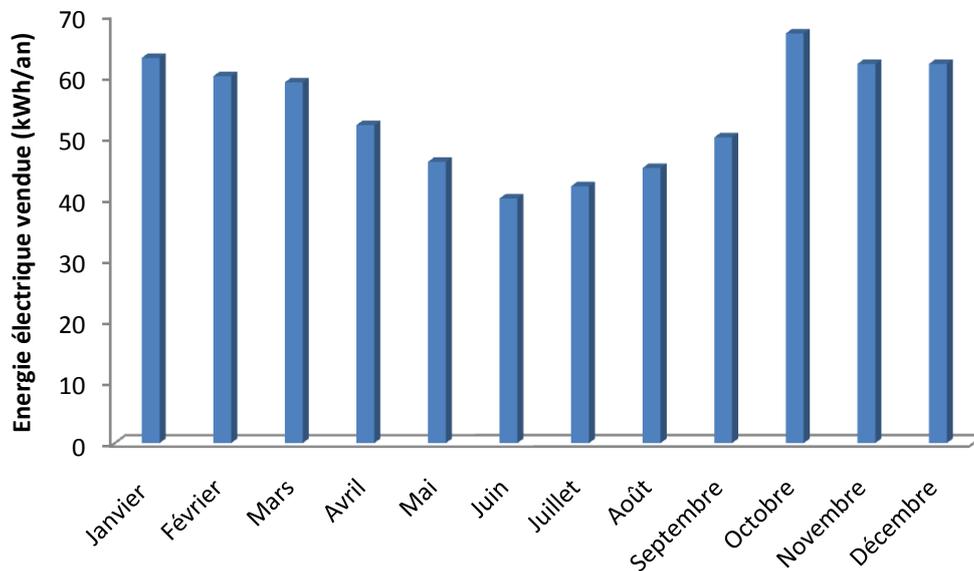


Figure 6 : Energie électrique vendue en fonction des mois.

L'énergie électrique vendue au réseau électrique varie de 40 kWh à 67kWh. Le maximum est enregistré au mois d'octobre et le minimum au mois de juin. L'énergie électrique totale achetée est de 648kWh.

5.6.6 Solde d'énergie achetée du réseau

Le solde d'énergie électrique achetée en fonction des mois de l'année est représenté par la figure 7.

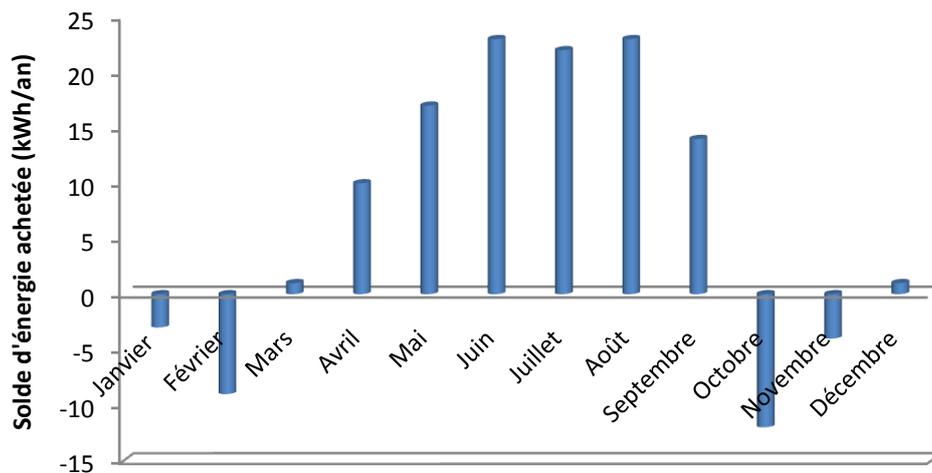


Figure 7: Solde d'énergie achetée en fonction des mois.

Le solde d'énergie achetée du réseau électrique varie de -12 kWh à 23kWh. Le maximum est enregistré au Juin et Août et le minimum au mois d'octobre. Le solde totale d'énergie achetée est de 82kWh car le reste d'énergie PV produite a été consommé.

Nous constatons que l'énergie PV apporte une contribution substantielle dans l'alimentation de la maison étudiée en énergie électrique.

5.6.7 Variation horaire Puissance du générateur PV

La variation horaire de la puissance du générateur photovoltaïque, dans deux jours différents, 15 janvier et 15 juillet, est représentée par la figure 8.

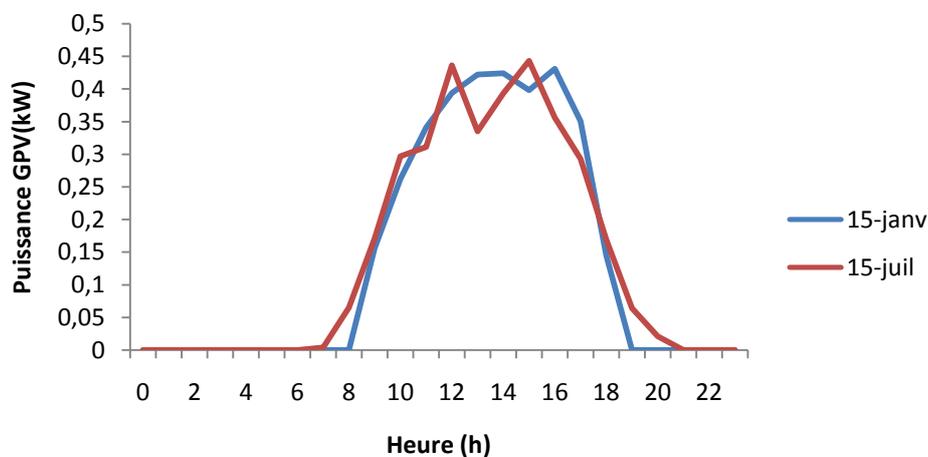


Figure 8: Puissance du GPV dans deux jours différents.

5.6.8 Variation horaire de la quantité d'électricité achetée du réseau

La variation de la quantité d'électricité achetée du réseau dans deux jours différents, 15 janvier et 15 juillet, est représentée par la figure 9.

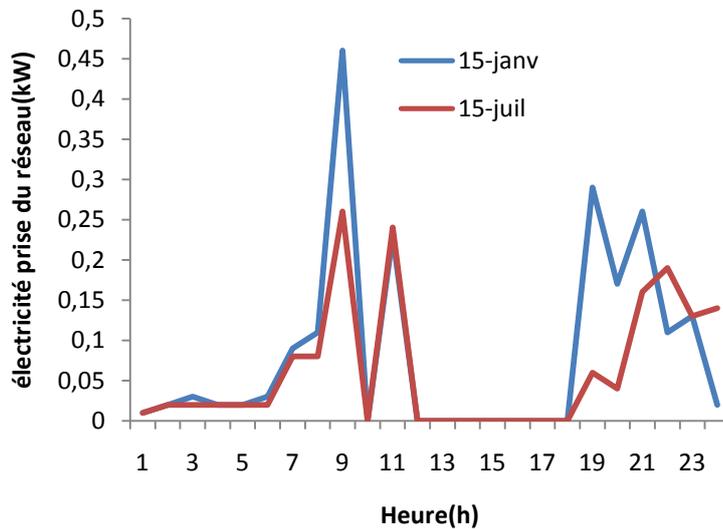


Figure 9: Quantité d'électricité prise du réseau dans deux jours différents.

5.6.9 Variation horaire de la quantité d'électricité vendue au réseau

La variation de la quantité d'électricité injectée dans le réseau dans deux jours différents, 15 janvier et 15 juillet, est représentée par la figure 10.

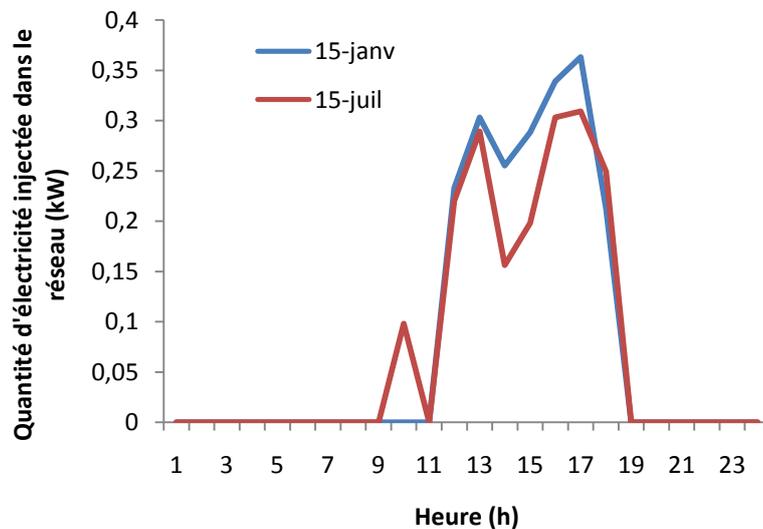


Figure 10: Quantité d'électricité injectée dans le réseau électrique d

5.7 Modélisation thermique de la maison

5.7.1 Présentation du logiciel TRNSYS

TRNSYS 'TRaNsient System Simulation Program' est un logiciel de simulation du comportement thermique des bâtiments et des systèmes associés en régime dynamique. Il permet le calcul des performances techniques : des bâtiments mono ou multizones des équipements thermiques des systèmes thermiques.

Dans notre travail, l'étude est basée sur la simulation numérique du bâtiment à l'aide du logiciel TRNSYS pour la saison chaude et froide avec un pas de temps de 1 heure. Nous effectuons d'abord une première simulation qui va nous servir de cas de référence. A partir de cette base, nous allons proposer des solutions dans le but d'améliorer les performances de la maison. Les solutions consistent à isoler l'enveloppe de l'habitation par l'utilisation des isolants performants tableau 5.9 et remplacer le simple vitrage par le double vitrage.

5.7.2 Architecture de l'habitation

La maison étudiée figure 5.8 est une structure multi zones qui se compose de deux chambres, un salon, une cuisine, une salle de bain et une toilette, d'une surface totale de 110 m².



Fig. 5.8 : Vue coté d'ensemble de l'habitation étudiée (Google Earth).

La maison est composée de quatre façades :

- Les façades, Est et Ouest sont accolées à une autre habitation.
- La façade Sud est exposée au soleil et bénéficie d'un bon ensoleillement.
- La façade Nord ne bénéficie d'aucun ensoleillement.

Le plan de la maison étudiée est représenté par la figure 5.9. Ce plan a été conçu à l'aide du logiciel archifacile qui est téléchargeable gratuitement sur internet.

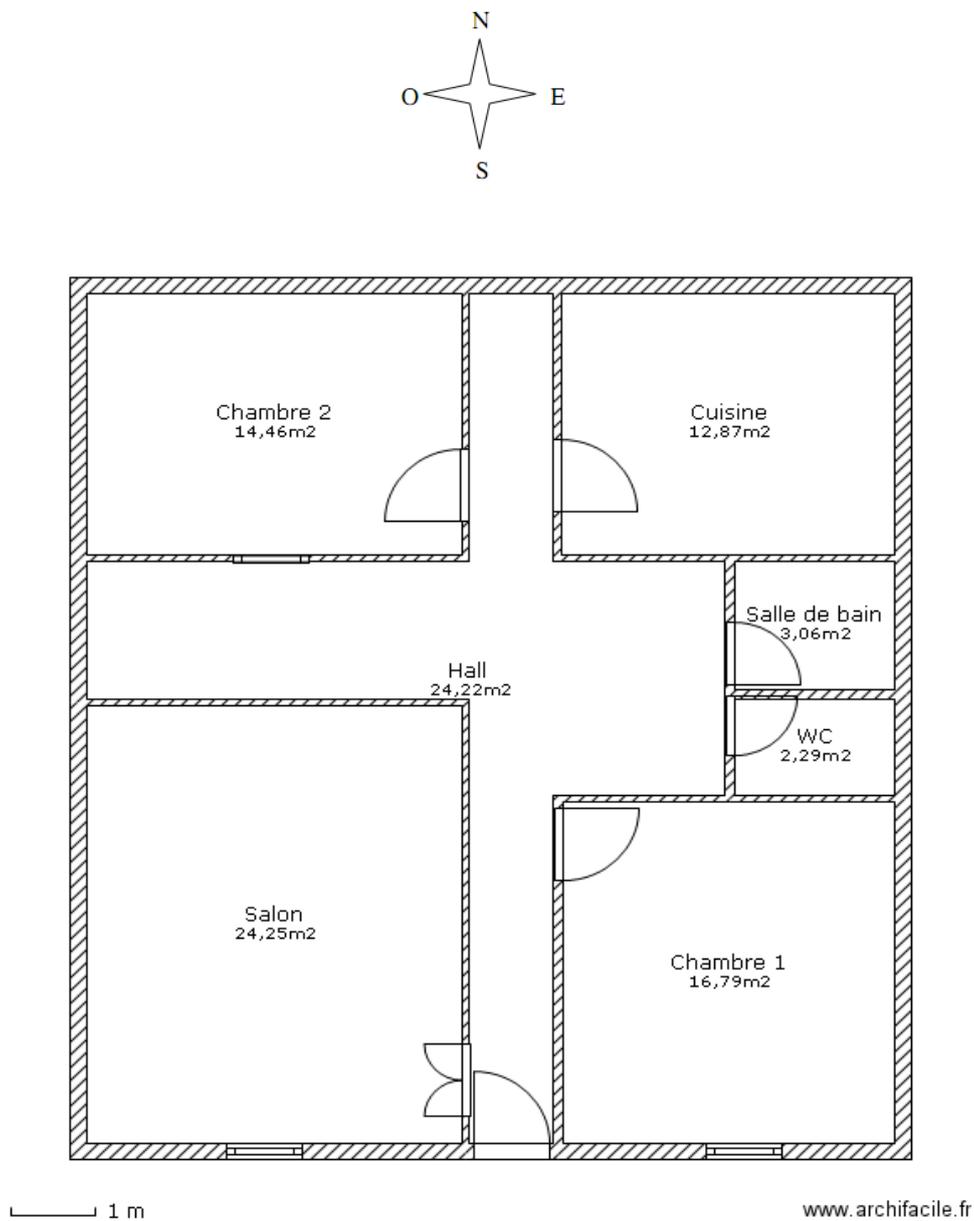


Fig. 5.9 : Vue en plan de la maison étudiée.

5.7.3 Déroulement de la simulation

Le déroulement de la simulation avec le logiciel TRNSYS a pris comme chemin trois étapes importantes.

La première concerne la programmation et l'établissement d'un programme global. Dans ce dernier, on a d'abord commencé par l'introduction des données météorologiques de la ville de Chlef, car elles ne figurent pas dans la bibliothèque du TRNSYS. Puis la description détaillée des pièces de la maison ainsi que les scénarios de leur occupation et l'introduction des différents paramètres de la simulation. La deuxième étape concerne le traitement des données après programmation. Enfin et en dernière étape, c'est faire sortir les résultats de la simulation par le biais du logiciel EXEL.

5.7.4 Définition des zones

La première étape est de séparer l'ensemble de la maison en différentes zones couplées les unes avec les autres.

Quatre zones ont été créées et sont répertoriées dans le Tableau 5.7. Chaque zone est considérée comme une cellule séparée pour laquelle il faut définir le volume et les surfaces des parois. Pour chaque paroi il faut définir ses caractéristiques ainsi que la zone adjacente.

L'introduction de ces caractéristiques se fait manuellement dans TRNBuild comme montre la figure 5.10.

Tableau 5.7 : zones de la maison.

Zone	Espace	Volume
1	Salon	67.90
3	Chambre 1	47.01
4	Chambre 2	40.48
5	Cuisine	36.03

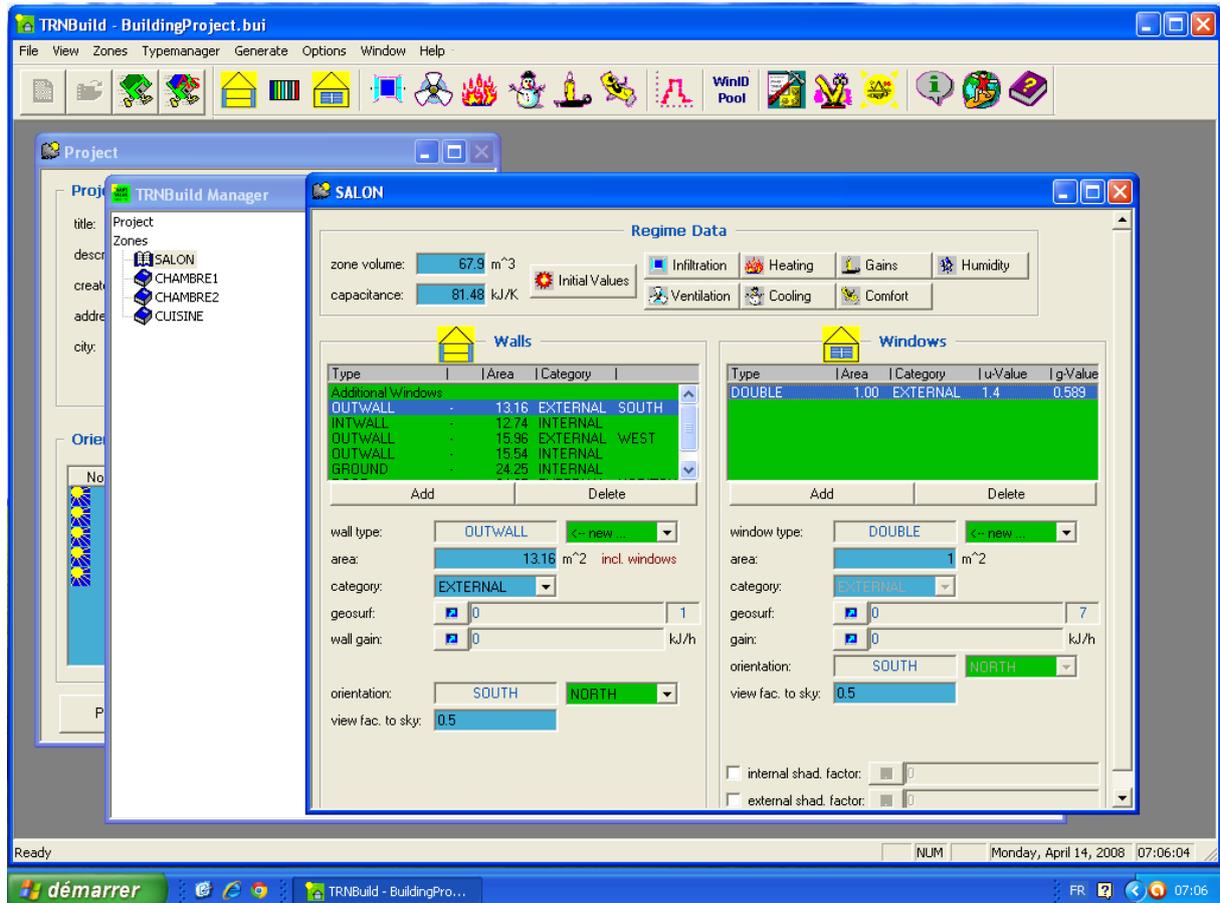


Fig. 5.10 : Initialisation du projet et fenêtre d'une zone.

5.7.4 Composition des parois

Le tableau 5.8 illustre la composition des parois de l'enveloppe de l'habitation originale avec les épaisseurs de chaque couche de la paroi et les valeurs du coefficient de déperdition thermique U.

Il est très important de définir une enveloppe de la maison la plus efficace possible en renforçant l'isolation des parois afin de minimiser les déperditions de chaleur.

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle de séparation thermique entre l'ambiance intérieure et extérieure, il intervient comme stockage de la chaleur dans la maison et comme distributeur de cette dernière à l'air intérieur pendant la nuit.

Le tableau 5.9 illustre la composition des parois de l'enveloppe de la maison avec les solutions proposées.

Tableau 5.8: Composition des parois de la maison originale.

Nature de la paroi	Matériaux	Epaisseur totale (cm)	U (W/m ² .K)
Mur extérieur	Enduit intérieur (2cm) + parpaing creux (20cm) + enduit extérieur (2cm).	24	2.303
Mure intérieur	Enduit intérieur (2cm) + parpaing creux (20cm) + enduit extérieur (2cm).	24	3.395
Plancher	Carrelage (2cm) +mortier (4cm) + Béton lourd (5cm).	11	3.466
Plafond	Enduit extérieur (2cm) + hourdis (15cm) +béton lourd (10cm)	27	2.338
Fenêtre	Simple vitrage		5.68

Tableau 5.9 : Composition des parois de la maison avec solutions.

Nature de la paroi	Matériaux	Epaisseur totale (cm)	U (W/m ² .K)
Mur extérieur	Enduit intérieur (2cm) + parpaing creux (20cm) + enduit extérieur (2cm) + polystyrène expansé 035 (6cm)	30	0.519
Mure intérieur	Enduit intérieur (2cm) + parpaing creux (20cm) + enduit extérieur (2cm).	24	3.995
Plancher	Carrelage (2cm) +mortier (4cm) + Béton lourd (5cm).	11	3.426
Plafond	Enduit extérieur (1cm) + hourdis (15cm) +béton lourd (10cm) + polystyrène expansé 035 (6cm)	32	0.51
Fenêtre	Double vitrage		1.4

5.7.6 Paramètres de la simulation

Des conditions simples pour l'ensemble des paramètres ont été définies pour le cas de base afin de débiter notre travail.

- Chauffage

Une température de consigne de chauffage de base de 19°C est appliquée toute l'année sans prendre en compte l'occupation de la maison, dans toutes les zones concernées par le chauffage, c'est-à-dire toutes sauf la zone de circulation et la salle de bain.

- Ventilation

Dans les mêmes zones que celles concernées par le chauffage, nous avons défini une ventilation simple flux un débit d'un volume par heure dans chaque zone et avec une température de soufflage de l'air égale à la température extérieure.

- Infiltration

Les valeurs minimums d'infiltration trouvées dans la littérature ont été définies, soit 0,2 volume par heure.

- Facteurs solaires

Le facteur solaire représente la part du soleil direct qui atteint l'habitation. Il dépend bien évidemment du vitrage mais également de la présence possible de stores extérieurs ou d'effets de masque. Dans notre cas aucun store n'a été défini.

- Scénario d'occupation

Il est nécessaire d'introduire dans le logiciel les apports thermiques dus à la présence des personnes dans l'habitation.

Ces sources de chaleur ont des influences non négligeables sur les consommations et les surchauffes.

Des scénarios d'occupation plausibles dans les différents locaux sont présentés dans les figures 5.11 et 5.12. Les deux figures définissent respectivement l'occupation lors d'une semaine standard et lors des week-ends avec une plus forte occupation.

Jour standard de la maison :

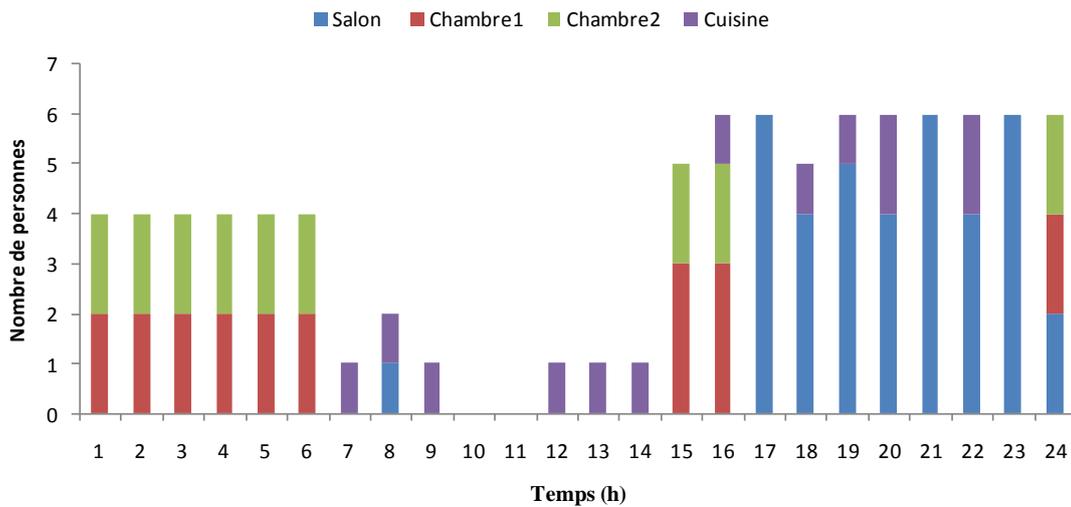


Fig.5.11: Profil d'occupation, semaine.

Week-end:

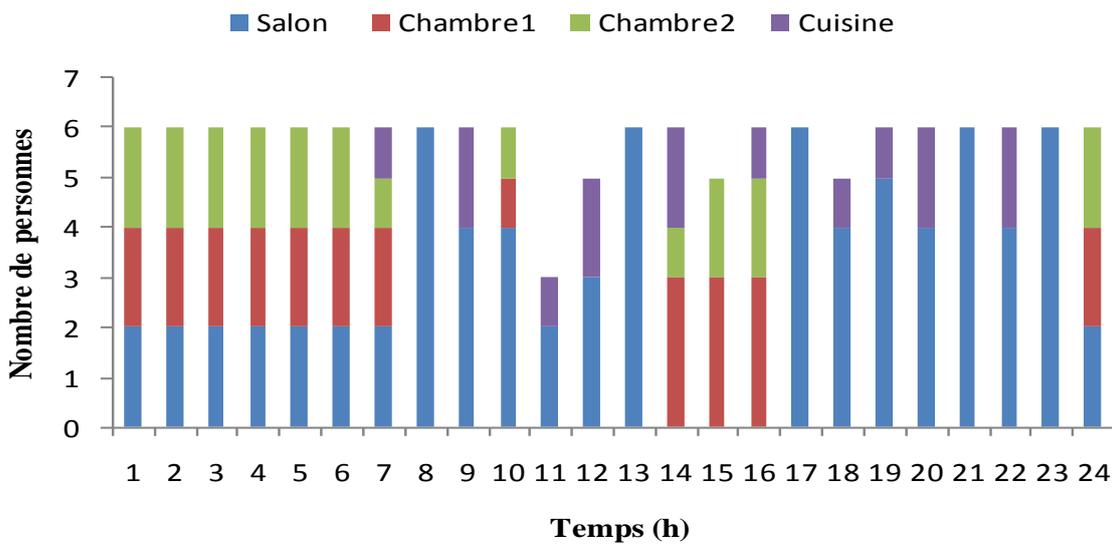


Fig.5.12: Profil d'occupation, week-end.

Pour les semaines de vacances scolaires, les journées de la semaine ont une occupation plus importante dans le salon principalement et les journées de type Week-end sont les mêmes. Les puissances dissipées par personne sont estimées à 100W.

- Puissances dissipées par les appareils électroménagers

L'utilisation d'appareils électriques de la vie courante est génératrice de dissipation de chaleur. Il est important de parvenir à estimer les puissances dégagées par chacun de ces appareils. Les puissances dégagées par les appareils les plus performants (classe A, basse consommation....) sont répertoriées dans le Tableau 5.10.

Tableau 5.10 : Puissance dégagée par les appareils électroménagers.

Appareils	Puissance (W)	Temps d'utilisation (h)	Zones
Réfrigérateur	100	24/24	Cuisine
Machine à laver	1000	En occupation	
Grille-pain	500		
Appareil cuisson	200		
Ordinateur	200	En occupation	Salon
Hi Fi (TV,...)	150		

- Schéma du programme global

Après l'introduction de différentes caractéristiques nécessaires à la simulation de la maison étudiée dans le sous programme TRNBuild, le programme global est généré et exécuté dans l'interface Simulation Studio, comme montre la figure 5.13.

Les deux fichiers des résultats des deux simulations sont présentés en détaille en annexe 4.

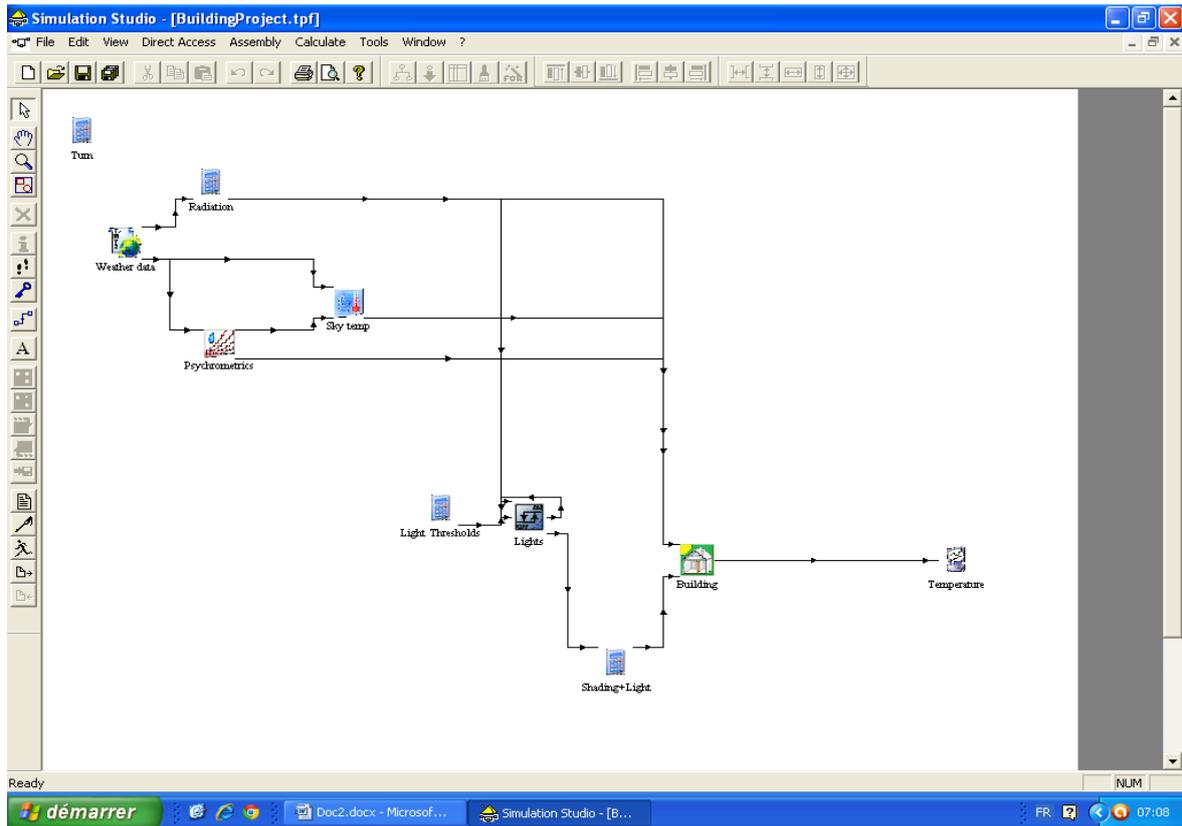


Fig. 5.13 : Fenêtre d'assemblage du projet dans TRNSYS simulation studio.

5.7.7 Résultats de la première simulation

Les besoins en chauffage et en climatisation de la maison originale sont présentés dans le tableau 5.11 et représentés par les figures 5.14 et 5.15.

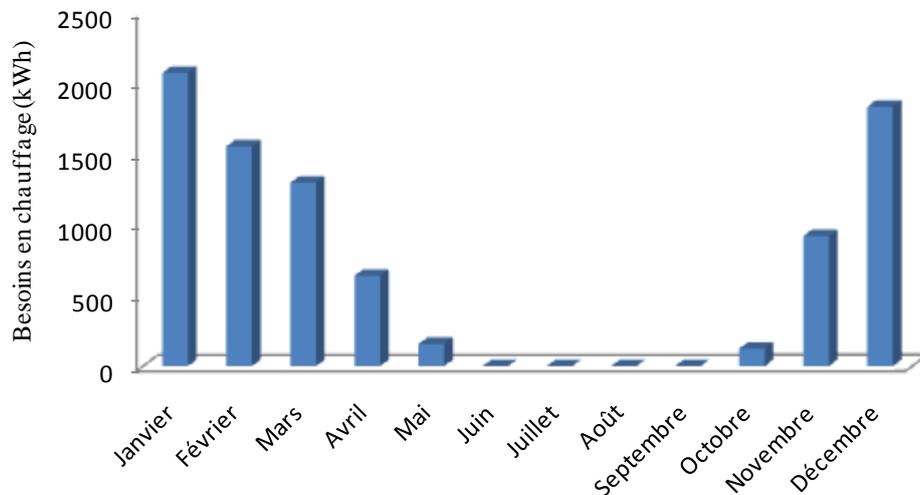
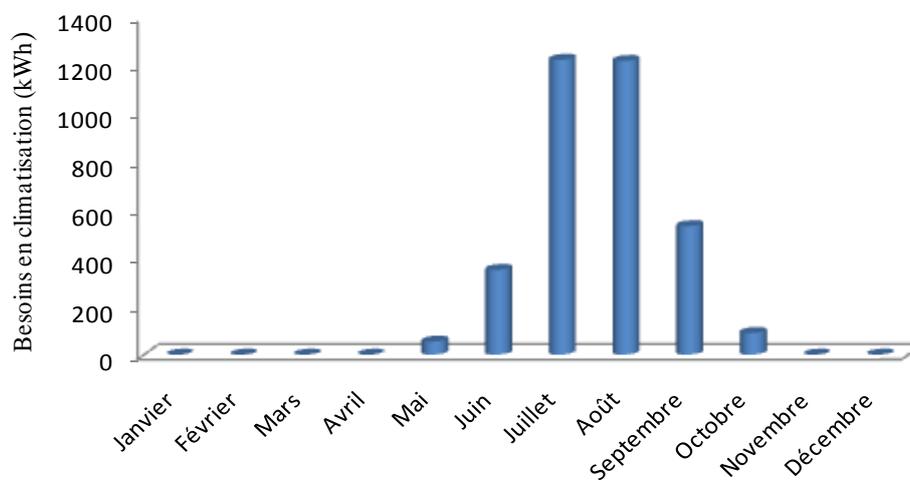


Fig. 5.14: Besoins en chauffage (kWh)

Tableau 5.11 : Besoins en chauffage et en climatisation de la maison originale.

Mois	Besoins chauffage		Besoins en climatisation	
	kWh/an	kWh/m ² /an	kWh/an	kWh/m ² /an
Janvier	2072	30	0	0
Février	1553	22.83	0	0
Mars	1297	19	0	0
Avril	638,9	9.39	0	0
Mai	156,8	2.30	53,96	0.79
Juin	0	0	351,5	5.16
Juillet	0	0	1224	18
Août	0	0	1219	17.92
Septembre	0	0	533,4	7.84
Octobre	123,3	1.81	89,79	1.32
Novembre	919,0	13.51	0	0
Décembre	1834	26.97	0	0
Total	8593	126	3472	51

Les valeurs de consommation pour le chauffage sont très élevées 8593 kWh/an soit 126 kWh/ (m².an), l'objectif pour une maison très peu consommatrice étant de parvenir à des valeurs inférieures à 15 kWh/ (m².an). [9]


Fig.5.15: Besoins en climatisation (KWh)

Concernant la climatisation, les valeurs sont assez élevées. En effet, les apports dus aux occupants et aux appareils électroménagers sont pris en compte.

5.7.8 Résultats de la deuxième simulation

Les besoins en chauffage et en climatisation de la maison originale sont présentés dans le tableau 5.12 et représentés par les figures 5.16 et 5.18.

Tableau 5.12 : Besoins en chauffage et en climatisation de la maison économique.

Mois	Besoins chauffage		Besoins en climatisation	
	kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/an	kWh/m ² /an
Janvier	432,0	6.35	0	0
Février	271,7	3.99	0	0
Mars	180,2	2.65	0	0
Avril	22,35	0.32	0	0
Mai	0	0	27,64	0.40
Juin	0	0	238,5	3.50
Juillet	0	0	705,8	10.37
Août	0	0	754,4	11.09
Septembre	0	0	457,7	6.73
Octobre	0	0	121,3	1.78
Novembre	40,51	0.59	0	0
Décembre	331,5	4.87	0	0
Total	1278	18.79	2305	33.89

L'isolation de l'enveloppe et de la toiture ont un effet considérable. Ils entraînent une diminution très importante des consommations en chauffage, 7315 kWh/an soit 85%.

Nous pouvons en déduire que l'enveloppe de l'habitation est plus performante en terme d'isolation, et limite les déperditions.

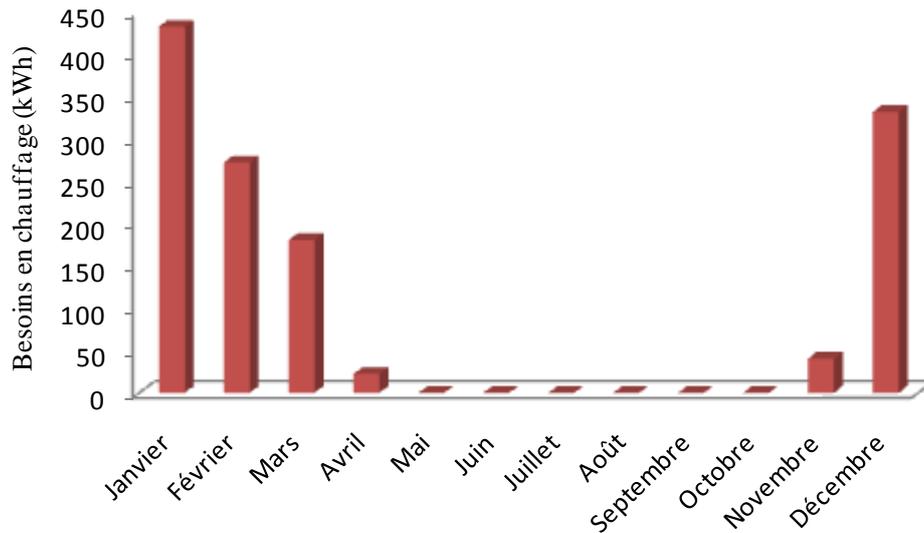


Fig. 5.16 : Besoins en chauffage (kWh) (2^{ème} simulation).

Sur la figure 5.17 suivante, où nous avons représenté les besoins en chauffage en fonction des mois, nous voyons très clairement, lorsque les mois sont froids (novembre, décembre, janvier), que la différence devient de plus en plus nette entre les deux logements. Par exemple en janvier, les besoins passent de 2000 à 500 kWh.

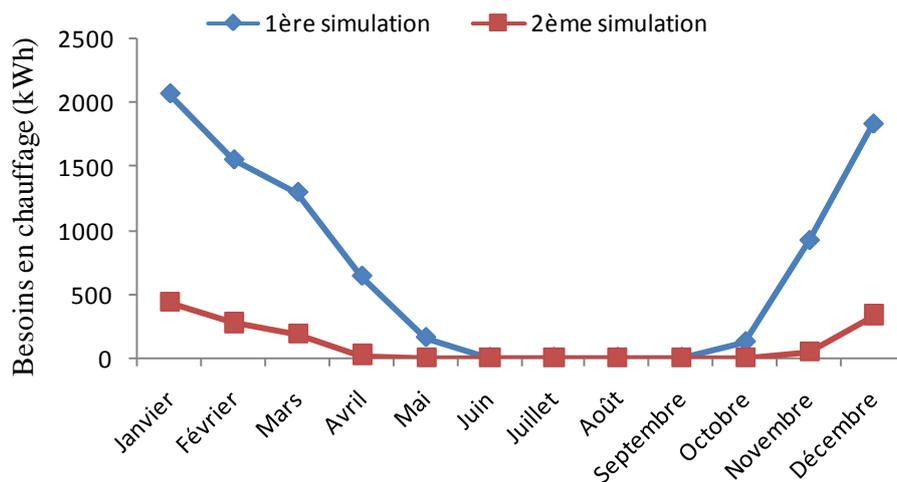


Fig. 5.17 : Comparaison des besoins en chauffage (kWh)

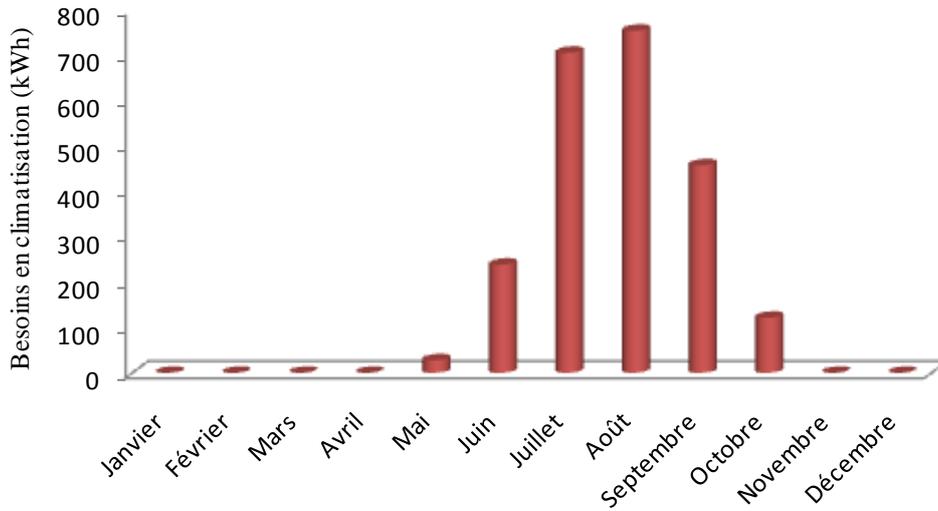


Fig.5.18 : Besoins en climatisation (kWh) (2^{ème} simulation)

Cependant, cette solution n'entraîne pas une réduction importante des consommations en climatisation, 1167 kWh/an soit 33%, comme montre la figure 5.18. Cela dus essentiellement aux apports internes qui sont stockés dans la maison.

Sur la Figure 5.19, où nous avons représenté les besoins en climatisation en fonction des mois, nous voyons très clairement, lorsque les mois sont chauds (juin, juillet, Août), que la différence devient de plus en plus nette entre les deux logements. Par exemple en Août, les besoins passent 1200 à 800 kWh.

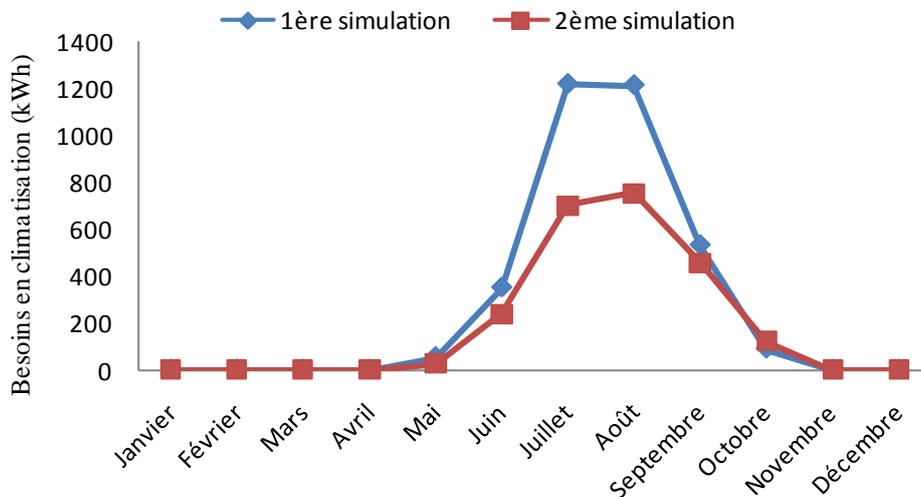


Fig. 5.19 : Comparaison des besoins en climatisation (kWh).

L'enveloppe protège du froid extérieur en hiver mais empêche la fraîcheur de pénétrer dans la maison en été, quand l'habitation est souvent plus chaude que l'extérieur.

Pour réduire donc davantage les besoins en climatisation, il est nécessaire d'évacuer en été les apports internes des occupants et la chaleur dissipée par les appareils électroménagers.

La Figure 5.20 représente les besoins en climatisation sans compter les apports internes de la maison.

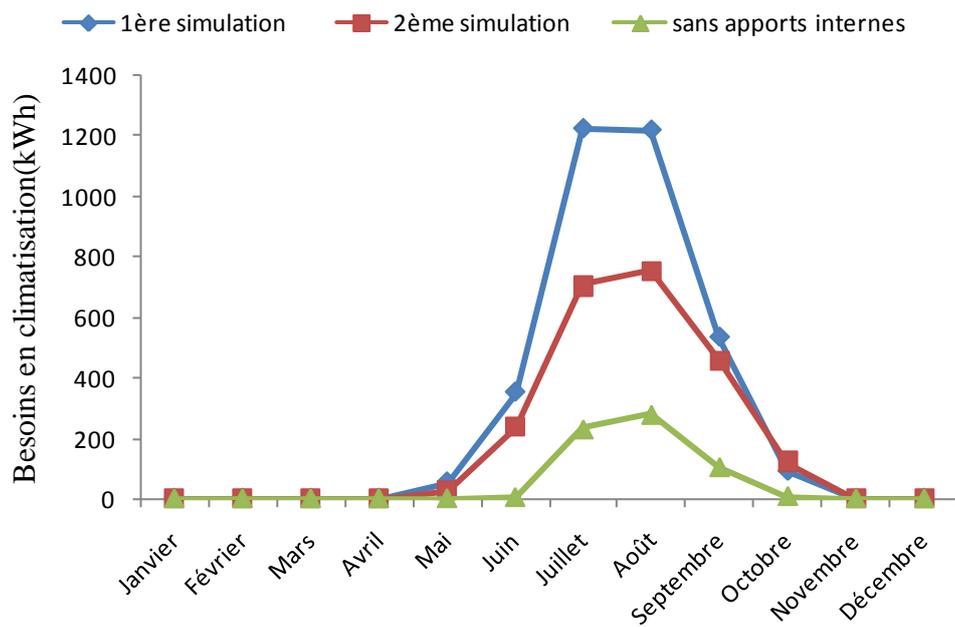


Fig. 5.20 : Besoins en climatisation sans apports internes.

Nous pouvons remarquer que l'évacuation des apports internes entraîne une diminution très importante des besoins en climatisation de l'habitation. Les besoins en climatisation sont chutés jusqu'à 625 kWh avec une diminution de 2847 kWh/an soit 81%.

La courbe des consommations totales, somme des consommations hiver et été, en fonction de l'épaisseur d'isolant permet de visualiser l'impact de l'épaisseur d'isolant sur les besoins énergétiques. L'évolution de l'épaisseur d'isolant de 5 à 30 cm est représentée sur la Figure 5.21.

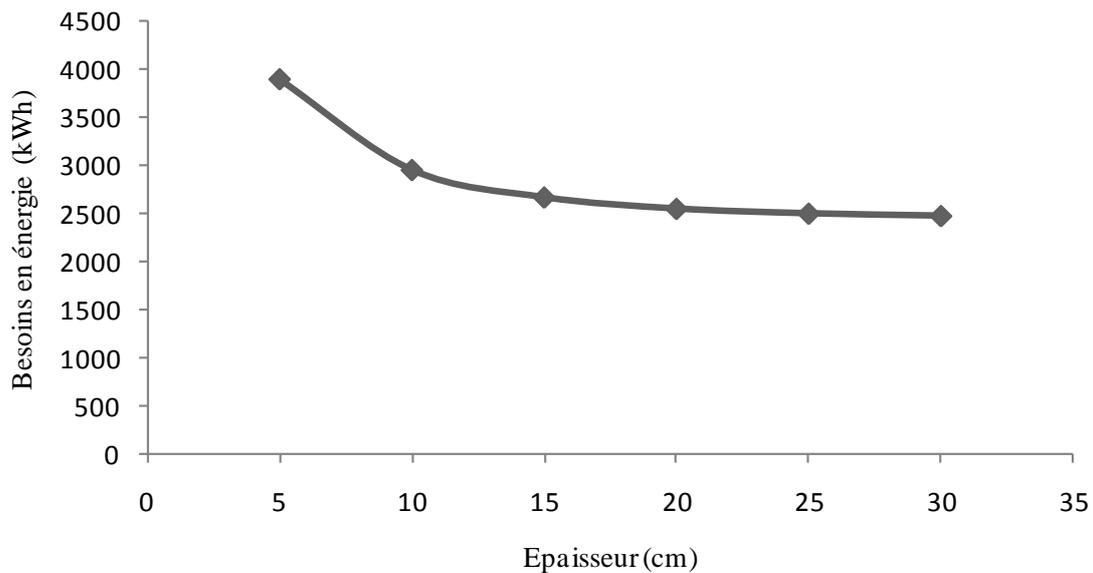


Fig.21 : Consommation totale en fonction de l'épaisseur de l'isolant.

Les consommations totales sur l'année diminuent beaucoup avec l'épaisseur d'isolant, ce qui confirme le fait que l'isolant a plus d'influence sur les besoins de chauffage que sur les besoins de froid. La courbe montre que les besoins tendent vers une asymptote qui se situe probablement entre 2000 et 2500 kWh/an. Ainsi l'épaisseur d'isolant augmentera, moins cela aura d'effet sur les consommations.

5.8. Conclusion

Nous avons procédé, dans chapitre, à l'analyse du bilan énergétique de l'habitation dans son état actuel. Nous avons constaté que la consommation électrique, ainsi que les besoins énergétiques nécessaires au chauffage et la climatisation de l'habitation, sont très élevées.

Dans le but de réduire ces besoins énergétiques, des solutions ont été proposées telles que le recours aux énergies renouvelables pour produire l'énergie électrique, et l'isolation des parois extérieures et la toiture pour la diminution des besoins en chauffage et en climatisation.

En hiver, l'isolation permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, en empêchant la chaleur de s'échapper de l'intérieur de la maison vers l'extérieur.

En été, l'isolation thermique permet d'améliorer le confort en contribuant au maintien d'une température intérieure en limitant le recours à la climatisation, forte consommatrice d'énergie.

Conclusion générale

Pour conclure, nous dirons que les résultats obtenus dans cette étude ont mis en évidence les aspects qui ont impact sur les besoins énergétiques d'une habitation située dans la région de Chlef. D'un point de vue pratique, les résultats présentés dans ce travail montrent que, dans une première phase, en agissant seulement sur l'éclairage, il est possible de réaliser des économies d'énergie électrique substantielles en consentant un très faible investissement qui peut être très rapidement amorti. En effet, l'éclairage dans les locaux à usage d'habitation étant assuré quasi exclusivement par des lampes à incandescence qui consomment beaucoup d'énergie électrique, le remplacement de ces lampes par des lampes électroniques basses consommations doit permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie électrique. Outre l'éclairage, l'utilisation des appareils électroménagers performants a permis également d'assurer d'autres économies d'énergie électrique.

Aussi, le travail effectué dans le cadre de cette thèse a permis d'étudier et d'optimiser un système photovoltaïque connecté au réseau. Ce système joue un rôle très important dans l'amélioration des performances énergétiques de la maison en produisant ce n'est qu'une partie des besoins électriques de l'habitation. Pour ce faire, nous avons apporté une attention particulière aux choix des différents composants constituant le système PV, en appréhendant le problème de fonctionnement à un point optimal.

Concernant le chauffage et la climatisation de la maison, le choix de l'enveloppe du bâtiment a une incidence notable sur la consommation d'énergie. Une bonne isolation permet également de contribuer à la protection de l'environnement: en effet, dépenser moins d'énergie c'est réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La modélisation de la maison sous le logiciel TRNSYS a permis de réaliser une optimisation complète et intéressante de l'enveloppe. Les consommations de chauffage et de climatisation sont considérablement réduites tout en conservant un aspect technique réalisable.

La mesure d'amélioration la plus justifiée économiquement est l'isolation des murs extérieurs et la toiture et l'utilisation du double vitrage. L'isolation du toit est très importante car les pertes d'énergies s'effectuent en grande partie par ce dernier (environ 30%).

Cependant, les caractéristiques d'une habitation ne garantissent pas un confort si les occupants ne font pas de gestion, notamment pour le confort d'été avec par exemple l'ouverture des fenêtres la nuit, qui permet entre autre un renouvellement d'air frais, et l'occultation le jour, qui évite trop d'apports solaires directement sur le sol et sur les parois.

D'après ces résultats, on peut procéder aussi à des décisions très importantes au niveau de la wilaya de Chlef. On cite à titre d'exemple :

- ✓ Remplacer, pour l'éclairage, les lampes à incandescence par des lampes électroniques basse consommation,
- ✓ Utilisation des appareils électroménagers performants.
- ✓ Il faut respecter soigneusement les normes et les principes de la conception bioclimatique dans la construction de bâtiments au niveau du site,
- ✓ Procéder à l'isolation des bâtiments neufs par des isolants performants,
- ✓ Le recours aux énergies renouvelables, pour produire ce n'est qu'une partie des besoins en énergies électriques.

Références bibliographiques

- [1] : Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Centre universitaire de Bechar, 2008.
- [2] : Olivier GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Ecole normale supérieure Cachan, 2002.
- [3] : Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [4] : YANN RIFFONNEAU, Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau, Université Joseph Fourier 2009.
- [5] : Bouden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [6] : Bendjellouli Zakaria, contribution à la modélisation d'une cellule solaire, Université de Bechar, 2009.
- [7] : Anne Labouret, Michel Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Edition LE MONITEUR.
- [8] : R.Merah, R.Chenni, M.Houbes, Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab, Journal of scientific Research N°10 VOL 1 (2010).
- [9] : RUELL François, Le standard « massive passive » en Belgique : potentialités et obstacles, Université Libre de Bruxelles 2008.
- [10] : Etude documentaire – Algérie (projet), Regional Center Energy and Energy Efficiency, Avril 2010.
- [11] : Yann Pankow, Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, Ecole National Supérieur d'Arts et Métiers, France 2004.
- [12] : CARREAU.C, DUFOUR .M, GIBILISCO.M, les énergies renouvelables dans l'habitat, France 2001.
- [13] : Stéphane THIERS, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Ecole normal supérieur des mines de Paris, France 2008.
- [14] : Nazila Kahina HANNACHI-BELKADI, Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, L'université Paris Est, France 2008.

- [15] : KHECHAREM Aymen, Modélisation thermique des bâtiments : Evaluation des principaux critères architecturaux sur la qualité thermique des bâtiments, Ecole national supérieur d'architecture de Nancy, France 2009.
- [16] : DIEZ-WEBSTER.U, RANDLE.S, Modélisation d'une maison à énergie positive, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon France 2006.
- [17] : M. GUENOUNOU Abderrezak, Mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristiques directe et inverse des modules photovoltaïques de différents technologies, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2009.
- [18] : Violaine Didier, les onduleurs pour systèmes photovoltaïques, fonctionnement, état de l'art et étude des performances, VILLEURBANNE 2007. Site internet : www.hespul.org
- [19] : M. PETIBON Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Université de Toulouse, 2009.
- [20] : CHENNI. Rachid, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Université Mantouri de constantine, 2007.
- [21] : Guerriat, A. *Maisons passives*, L'Inedite, Paris, 2008
- [22] : Liena, Vilde. MODELLING A PV MODULE USING MATLAB, University of leeds, 2010.
- [23]: Geoff Walker. EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL, University of Queensland, Australia.
- [24]: BORNI ABDELHALIM. Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire, Constantine 2009.
- [25] : les systèmes photovoltaïques « Guide de l'acheteur » Canada 2003.
- [26]: Viorel Badescu, Mihail Dan Staicovici, Renewable energy for passive house heating model of the active solar heating system, Romania 2005.
- [27]: TRNSYS 16, Volume 6, Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild, by Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison 2007.
- [28]: MEDJELEKH DALEL, impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 2006.
- [29] : http://www.prosolaire.ca/Puissance_de_londuleur.php
- [30] : <http://lucieroux.com/costelec/photovoltaique.html>
- [31] : <http://www.lamaisonpassive.be/isolation-thermique>
- [32] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente
- [33] : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php?lang=fr&map=europe>

Annexe 1 : Module Photovoltaïque PHOTOWattsPW6-110-Wp- 12V :



APPLICATIONS

- Raccordement au réseau
- Champs solaires
- Intégration de bâtiments
- Pompage
- Télécommunications
- Electrification rurale

- Module haut rendement
- 4x9 cellules polycristallines (150 x 150 mm)
- Cadre en aluminium anodisé renforcé
- Garantie produit : 5 ans*
- Garantie puissance : 25 ans*
- Tolérance de puissance : +/- 3%
- Certificats qualité : ESTI (61215), ISO 9001...



IEC61215

Le module PW6-110 est le dernier né des modules à haut rendement Photowatt, réalisé avec de grandes cellules 6 pouces. Facile à manipuler grâce à sa petite taille, ce module fournit une forte puissance pour une taille optimisée.

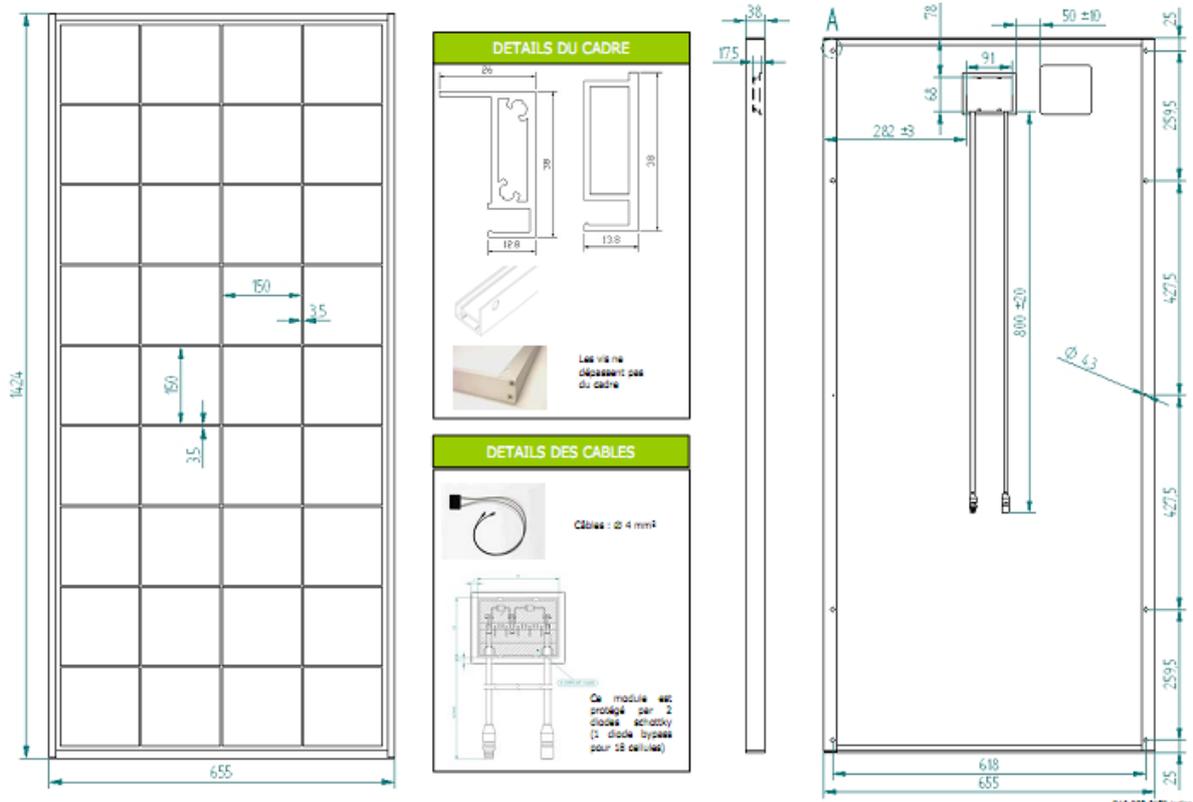
Le PW6-110 utilise la technologie des cellules multicristallines PHOTOWATT. Les cellules solaires sont mesurées individuellement et triées électroniquement avant d'être interconnectées. L'encapsulation des cellules est réalisée entre une plaque de verre trempé et une feuille de Tedlar. L'encapsulant, de l'EVA résistant aux UV, enrobe les cellules photovoltaïques à l'intérieur des laminés et protège les cellules de la corrosion. La face arrière du module est étanche et protégée des dommages mécaniques par une feuille polymère continue et résistante.

Avec un centrage des tolérances à +/-3%, le PW6-110 garantit l'homogénéité de puissance de vos installations, et un investissement financier correspondant réellement aux watts produits.

EMBALLAGE		
Poids du module	Kg	12,5
Taille du module avec câbles	mm	1424 x 655 x 38
Taille du module avec Jbox	mm	1424 x 655 x 45
Type d'emballage	modules	2 pAr carton
Taille de l'emballage	mm	1565 x 675 x 100
Poids emballé	Kg	27
Taille maximum d'une palette (26 modules)	mm	1600 x 752 x 1450
Poids maximum d'une palette (26 modules)	Kg	366

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES				
PW6-110	Configuration 12 V			
	Puissance typique	W	90	100
Puissance minimale	W	85	95,1	105,1
Tension à la puissance typique	V	16,4	16,7	17,2
Intensité à la puissance typique	A	5,5	6,0	6,4
Intensité de court circuit	A	6,1	6,5	6,9
Tension en circuit ouvert	V	21,1	21,5	21,7
Tension maximum du circuit	V	1000V DC		
Coefficients de température	a = +2,085 mW/°C ; β = -79 mV/°C ; γ P/P = -0,43 % /°C			
Spécifications de puissance à 1000 W/m ² : 25°C : AM 1,5				

Dimensions du module :



Annexe 2 :**Onduleur Sunny Boy 4 000 TL****Caractéristiques techniques :****Entrée (DC)**

Puissance DC max. (quand $\cos \varphi = 1$)	5300 W
Tension DC max.	550 V
Plage de tension photovoltaïque MPPT	175 V - 440 V
Tension nominale DC	400 V
Tension DC min. / tension de démarrage	125 V / 150 V
Courant max. par MPPT / par entrée	2 x 15 A / 15 A
Nbr. de trackers / Nbr. max. d'entrées (parallèle)	2 / A : 2, B : 2

Sortie (AC)

Puissance nominale AC (230 V, 50 Hz)	4600 W
Puissance apparente AC max.	5000 VA
Tension nominale AC / plage	220, 230, 240 V ; 180 V - 260 V
Fréquence du réseau AC / plage	50, 60 Hz ; $\pm 4,5$ Hz
Courant de sortie max.	22 A
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)>	1
Phase d'injection / phases de raccordement	1 / 1

Rendement

Rendement max. / Euro-eta	97 % / 96,5 %
---------------------------	----------------------

Dispositifs de protection

Protection inversion de polarité DC	Oui
-------------------------------------	------------

Annexe 3 :

Description de la maison :

Zone	Volume (m³)	Surface (m²)	Type du mur	Orientation	Surface (m²)
Salon	67.9	24.25	Extérieur	Sud	13.16
			Intérieur	Nord	12.74
			Extérieur	Ouest	15.96
			Intérieur	Est	15.54
Chambre1	47.01	16.79	Extérieur	Sud	11.76
			Intérieur	Nord	11.06
			Intérieur	Ouest	12.18
			Extérieur	Est	12.6
Chambre2	40.48	14.46	Intérieur	Sud	12.74
			Extérieur	Nord	13.16
			Extérieur	Ouest	8.68
			Intérieur	Est	9.38
Cuisine	36.03	12.87	Intérieur	Sud	11.32
			Extérieur	Nord	11.76
			Intérieur	Ouest	9.38
			Extérieur	Est	9.8

Annexe 4 :**Résultats de simulation du logiciel TRNSYS.**

4.1 Maison conventionnelle (Première simulation)

* *

* MONTHLY SUMMARY STANDARD REPORT *

* *

SUMMARY VALUES FOR ALL ZONES COMBINED

MONTH	HEATING	COOLING	INFILTR.	VENTILAT.	SOLAR_RAD.	INT_GAINS
-	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]
JAN	2.072E+03	0.000E+00	-8.451E+01	-4.226E+02	1.470E+02	4.300E+02
FEB	1.553E+03	0.000E+00	-7.159E+01	-3.580E+02	1.617E+02	3.884E+02
MAR	1.297E+03	0.000E+00	-7.148E+01	-3.574E+02	1.839E+02	4.300E+02
APR	6.389E+02	3.192E-02	-5.805E+01	-2.903E+02	1.607E+02	4.162E+02
MAY	1.568E+02	5.396E+01	-4.591E+01	-2.295E+02	1.582E+02	4.300E+02
JUN	2.051E-01	3.515E+02	-3.378E+01	-1.689E+02	1.525E+02	4.162E+02
JUL	0.000E+00	1.224E+03	-1.030E+01	-5.148E+01	1.614E+02	4.300E+02
AUG	0.000E+00	1.219E+03	-6.422E+00	-3.211E+01	1.695E+02	4.300E+02
SEP	0.000E+00	5.334E+02	-2.174E+01	-1.087E+02	1.888E+02	4.162E+02
OCT	1.233E+02	8.979E+01	-3.185E+01	-1.593E+02	1.805E+02	4.300E+02
NOV	9.190E+02	1.937E-01	-5.135E+01	-2.567E+02	1.545E+02	4.162E+02
DEC	1.834E+03	0.000E+00	-7.699E+01	-3.850E+02	1.619E+02	4.300E+02
SUM	8.593E+03	3.472E+03	-5.640E+02	-2.820E+03	1.981E+03	5.063E+03

4.2 Maison économique (deuxième simulation)

* *

* MONTHLY SUMMARY STANDARD REPORT *

* *

SUMMARY VALUES FOR ALL ZONES COMBINED

MONTH	HEATING	COOLING	INFILTR.	VENTILAT.	SOLAR_RAD.	INT_GAINS
-	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]	[KWH]
JAN	4.320E+02	0.000E+00	-8.526E+01	-4.263E+02	7.229E+01	4.391E+02
FEB	2.717E+02	0.000E+00	-7.273E+01	-3.637E+02	7.847E+01	3.966E+02
MAR	1.802E+02	1.872E-08	-7.288E+01	-3.644E+02	8.693E+01	4.391E+02
APR	2.235E+01	0.000E+00	-6.296E+01	-3.148E+02	7.340E+01	4.250E+02
MAY	0.000E+00	2.764E+01	-5.458E+01	-2.729E+02	7.123E+01	4.391E+02
JUN	2.292E-04	2.385E+02	-4.458E+01	-2.229E+02	6.864E+01	4.250E+02
JUL	0.000E+00	7.058E+02	-1.225E+01	-6.125E+01	7.191E+01	4.391E+02
AUG	0.000E+00	7.544E+02	-7.952E+00	-3.976E+01	7.657E+01	4.391E+02
SEP	0.000E+00	4.577E+02	-2.883E+01	-1.441E+02	8.784E+01	4.250E+02
OCT	0.000E+00	1.213E+02	-5.504E+01	-2.752E+02	8.655E+01	4.391E+02
NOV	4.051E+01	0.000E+00	-6.085E+01	-3.043E+02	7.581E+01	4.250E+02
DEC	3.315E+02	0.000E+00	-7.873E+01	-3.936E+02	8.029E+01	4.391E+02
SUM	1.278E+03	2.305E+03	-6.366E+02	-3.183E+03	9.299E+02	5.170E+03

Annexe 5:

Présentation du logiciel HOMER :

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybride, composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres.

Que l'installation soit reliée au réseau électrique ou non, HOMER permet de déterminer comment les sources d'énergies intermittentes comme l'éolien et le solaire peuvent être intégrées de manière optimale au sein des systèmes hybrides.

HOMER a été initialement développé dès 1993 par le National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale. Depuis 2009, il est disponible sous la licence HOMER Energy.

Rayonnement solaire incident sur le plan du générateur photovoltaïque

Déclinaison solaire

HOMER utilise l'équation suivante pour calculer la déclinaison solaire

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{248 + n}{365}\right)$$

n : jour de l'année (varie de 1 à 365)

Angle horaire

HOMER utilise l'équation suivante pour calculer l'angle horaire

$$\omega = (t_s - 12hr) \cdot 15^\circ/hr$$

t_s : Temps solaire [hr] tel que :

$$t_s = t_c + \frac{\lambda}{15^\circ/hr} - Z_c + E$$

t_c : est le temps civil dans les heures correspondant au point médian de l'intervalle de temps [hr]

λ : est la longitude [°]

Z_c : est le fuseau horaire en heures à l'Est de GMT [hr]

E : est l'équation du temps [hr]

Et :

$$E = 3.82 \left(\begin{array}{l} 0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \beta - 0.032077 \cdot \sin \beta \\ -0.01462 \cdot \cos 2\beta - 0.04089 \cdot \sin 2\beta \end{array} \right)$$

Où B est par :

$$\beta = 360^\circ \frac{n - 1}{365}$$

Maintenant, pour une surface avec n'importe quelle orientation, nous pouvons définir l'angle d'incidence, ce qui signifie l'angle entre une irradiation du soleil et la normale à la surface, en utilisant l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \Phi \cos \beta \\ &\quad - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

θ : est l'angle d'incidence [°]

β : est la pente de la surface [°]

γ : est l'azimut de la surface [°]

Φ : est la latitude [°]

δ : est la déclinaison solaire [°]

ω : est l'angle horaire [°]

Pour calculer le rayonnement extraterrestre normal, HOMER utilise l'équation suivante:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

G_{on} : est le rayonnement extraterrestre normale [kW/m²]

G_{sc} : est l'énergie solaire constante [1,367 kW/m²]

n est le jour de l'année [un nombre entre 1 et 365]

Pour calculer le rayonnement extraterrestre horizontal, Homer utilise l'équation suivante:

$$G_0 = G_{on} \cos \theta_z$$

G_0 : est le rayonnement extraterrestre horizontale [kW/m²]

G_{on} : est le rayonnement extraterrestre normale [kW/m²]

θ_z : est l'angle zénithal [°]

La moyenne de rayonnement extraterrestre horizontale sur le pas de temps est donnée par l'équation :

$$\overline{G}_0 = \frac{12}{\pi} G_{on} \left[\cos\delta \cos\Phi (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180^\circ} \cos\delta \sin\Phi \right]$$

\overline{G}_0 : est le rayonnement extraterrestre horizontale moyennée sur l'étape [kW/m2] temps

ω_1 : est l'angle horaire au début de l'intervalle de temps [°]

ω_2 : est l'angle horaire à la fin de l'intervalle de temps [°]

L'équation suivante définit l'indice de clarté:

$$k_t = \frac{\overline{G}}{\overline{G}_0}$$

\overline{G} : est le rayonnement global horizontal sur la surface de la terre en moyenne sur l'étape [kW/m2]

La somme du rayonnement diffus et réfléchis est appelée rayonnement solaire global, une relation exprimée par l'équation suivante:

$$\overline{G} = \overline{G}_b + \overline{G}_d$$

\overline{G}_b : est le rayonnement réfléchis [kW/m2]

\overline{G}_d : est le rayonnement diffus [kW/m2]

Homer doit résoudre le rayonnement global horizontal dans son composant réfléchis et diffus pour trouver le rayonnement incident sur le photovoltaïque. Pour cette finalité HOMER utilise la corrélation d'Erbs et al. (1982), qui donne la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté comme suit:

$$\frac{\overline{G}}{\overline{G}_d} = \begin{cases} 1.0 - 0.09 \cdot k_t & \text{for } k_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 \cdot k_t + 4.388 \cdot k_t^2 - 16.638 k_t^3 + 12.366 k_t^4 & \text{for } 0.22 < k_t \leq 0.80 \\ 0.165 & \text{for } k_t > 0.80 \end{cases}$$

L'équation suivante définit R_b , le taux du rayonnement réfléchis sur la surface inclinée par rapport au rayonnement réfléchis sur la surface horizontale:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

L'indice anisotropie est donné par l'équation suivante:

$$A_i = \frac{\bar{G}_b}{\bar{G}_0}$$

Le dernier facteur que nous devons définir est un facteur utilisé pour rendre compte de «l'horizon éclaircissement», ou le fait que plus de rayonnement diffus provient de l'horizon que le reste du ciel. Ce terme est lié à la nébulosité et est donnée par l'équation suivante:

$$f = \sqrt{\frac{\bar{G}_b}{\bar{G}}}$$

Le modèle calcule rayonnement incident global sur le générateur photovoltaïque en fonction de l'équation suivante:

$$\bar{G}_t = (\bar{G}_b + \bar{G}_d A_i) R_b + \bar{G}_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \bar{G}_{\rho_g} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Avec :

β : est la pente de la surface [°]

ρ_g : est la réluctance du sol, qui est aussi appelée albédo [%]

Calcul de le puissance délivrée par le générateur PV :

Homer utilise la formule suivante pour calculer la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque:

$$P_{pv} = Y_{pv} f_{pv} \left[\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right] [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC})]$$

Y_{pv} : Puissance crête du générateur photovoltaïque [kW]

f_{pv} : Coefficient de performance PV [%]

G_T : Rayonnement solaire incident sur le plan du générateur photovoltaïque [kW/m²]

$G_{T,STC}$: Rayonnement solaire incident dans les conditions standards [1kW/m²]

α_P : Coefficient de température [%/°C]

T_C : Température de la cellule photovoltaïque [°C]

$T_{C,STC}$: Température de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards [25 °C]

Si la température n'a pas d'influence sur la puissance du générateur PV, Homer prend le coefficient de température α_p égale à zéro.

$$P_{pv} = Y_{pv} f_{pv} \left[\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right]$$

Le tableau suivant contient la valeur moyenne du coefficient de la température pour différents types de modules PV.

Type du module PV	Valeur moyenne α_p [%/°C]
Silicium polycristallin	-0.48
Silicium monocristallin	-0.46
Silicium hybride monocristallin /amorphe	-0.30
Silicium amorphe couche mince	-0.20
couche mince SIC	-0.60

Coûts :

HOMER calcule le coût total actuel net en utilisant l'équation suivante:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})}$$

$C_{ann,tot}$ = coût total annualisé [\$/an]

CRF () = facteur de recouvrement du capital

i : taux d'intérêt = [%]

R_{proj} = projet de vie [an]

Le coût total annualisé est la somme des coûts annualisés de chaque composant du système, plus le coût d'autres annualisé.

Le coût total annualisé est la somme des coûts annualisés de chaque composant du système, plus les autres coûts annualisés.

HOMER calcule le coût d'investissement annualisé de chaque composante par l'équation suivante:

$$C_{acap} = C_{cap} \cdot CRF(i, R_{proj})$$

C_{cap} : Coût du capital initial de la composante

HOMER calcule les autres coûts annualisés par l'équation suivante:

$$C_{acap,other} = C_{cap,other} \cdot CRF(i, R_{proj})$$

$C_{cap,other}$: *autre* Coût du capital

Efficacité :

Les fabricants de systèmes photovoltaïques déclarent rarement cette efficacité dans leurs brochures de produits, mais on peut le calculer pour chaque module PV en utilisant l'équation suivante:

$$\eta_{mp,STC} = \frac{Y_{pv}}{A_{pv} G_{T,STC}}$$

$\eta_{mp,STC}$: est l'efficacité du module PV dans des conditions de test standard [%]

Y_{pv} : Puissance crête du générateur photovoltaïque dans des conditions de test standard [kW]

A_{pv} : est la superficie de la module PV [m²]

$G_{T,STC}$: Rayonnement solaire incident dans les conditions standards [1kW/m²]

Production du réseau électrique :

Charge énergie

Homer calcule la charge annuelle totale d'énergie en utilisant l'équation suivante:

$$C_{grid,énergie} = \sum_i^{rates} \sum_j^{12} E_{gridpourc\ hases,i,j} \cdot C_{power,i} - \sum_i^{rates} \sum_j^{12} E_{gridsales,i,j} \cdot C_{sellback,i}$$

$E_{gridpourc\ hases,i,j}$: Quantité d'énergie achetée du réseau dans le mois j pendant le temps que le taux de i s'applique [kWh]

$C_{power,i}$ = le prix du réseau électrique pour le tarif i [\$ / kWh]

$E_{gridsales,i,j}$ = la quantité d'énergie vendue au réseau dans le mois j pendant le temps que le tarif i s'applique [kWh]

$C_{sellback,i}$ = le taux de revendre pour le tarif de i [\$ / kWh]

Si la facturation nette s'applique et la production nette est calculé mensuellement, HOMER calcule la charge annuelle totale d'énergie en utilisant l'équation suivante:

$$C_{grid, \acute{e}nergie} = \sum_i^{rates} \sum_j^{12} \left(\begin{array}{l} E_{netgridpourc\ hases, i, j} \cdot C_{power, i}, \text{ if } E_{netgridpourc\ hases, i, j} \geq 0 \\ E_{netgridsales, i, j} \cdot C_{sellback, i}, \text{ if } E_{netgridsales, i, j} < 0 \end{array} \right)$$

$E_{netgridpourc\ hases, i, j}$: Énergie net achetée du réseau dans le mois j pendant le temps que le tarif i s'applique [kWh]

Si la facturation nette s'applique et la production nette est calculée annuellement, HOMER calcule la charge annuelle totale d'énergie en utilisant l'équation suivante:

$$C_{grid, \acute{e}nergie} = \sum_i^{rates} \left(\begin{array}{l} E_{netgridpourc\ hases, i} \cdot C_{power, i}, \text{ if } E_{netgridpourc\ hases, i} \geq 0 \\ E_{netgridsales, i} \cdot C_{sellback, i}, \text{ if } E_{netgridsales, i} < 0 \end{array} \right)$$

$E_{netgridpourc\ hases, i}$: Énergie annuelle net achetée du réseau pendant le temps que le tarif i s'applique [kWh]

Charge de la demande

HOMER calcule le total des frais annuels de la demande du réseau en utilisant l'équation suivante:

$$C_{grid, \acute{e}nergie} = \sum_i^{rates} \sum_j^{12} P_{grid, peak, i, j} \cdot C_{demand, i}$$

$P_{grid, peak, i, j}$: Demande de pointe horaire du réseau en J mois pendant le temps que le tarif i s'applique [kWh]

$C_{demand, i}$: le tarif de la demande du réseau pour le tarif i [\$/kW / mois]