

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de Technologie - Département d'Hydraulique



Mémoire

Présentée pour l'obtention du **Diplôme de Master**

En : Hydraulique

Option : Eau Sol et Aménagement

Par : HAMDAN Ahmed Amine & GAHAL Sohaib

Sujet

**Pompage de l'eau solaire en zones rurales agropastorales de l'Algérie :
Etude de cas.**

Soutenue publiquement le 12 /06 / 2017

Devant le jury composé de :

Mr BOUCHELKIA Hamid	MAA	Univ. Tlemcen	Président
Mr. BENMASOUR Abdelhalim	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr. SEDDINI Abdelali	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. TERKI HASSAINE Amine	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2016 / 2017

REMERCIEMENTS

Au terme de ce laborieux travail de projet de fin d'études (PFE), nous remercions avant tout ALLAH, le tout puissant de nous avoir permis de l'accomplir.

Ensuite, nous voulons adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à l'accomplissement de ce passionnant mémoire ;

En commençant par Monsieur BENMANSOUR Abdelhalim, professeur à l'université de Tlemcen qui nous a encadré tout au long de nos recherches. Ses grandes qualités scientifiques nous ont été très précieuses. Son soutien moral et ses conseils nous ont été inestimables.

Merci à Monsieur CHERIF Zine El Abidine qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.

On exprime également toute notre gratitude aux membres du jury et aux examinateurs, messieurs SEDDINI Abdelali et TERKI HASSAINE Amine qui ont bien voulu s'intéresser à notre travail de mémoire.

Merci à Monsieur BENADDA Lotfi, qui nous a transmis des références d'études sur certaines de nos recherches et surtout pour son soutien et ses conseils tout au long de notre travail.

On adresse par ailleurs nos remerciements aux chercheurs permanents de l'URAER de Ghardaïa, qui nous ont accueillis au sein de l'unité et qui nous ont aidés tout au long de notre stage tellement bénéfique à notre travail de mémoire.

Enfin, on dédie ce mémoire à toute notre famille : nos grands-parents, parents, frères, sœurs et amis, qui nous ont aidés, soutenus et encouragés tout au long de notre cursus universitaire.

Liste des abréviations

PV : Panneaux photovoltaïques.

°C : Degré Celsius.

δ : La déclinaison.

ψ : L'attitude du lieu.

TSV : Le temps solaire vrai.

σ : Le taux d'insolation.

G_{SC} : La constante solaire.

n : Le numéro de jour de l'année.

$\bar{S}(h)$: La durée d'insolation moyenne journalière.

$\bar{S}_0(h)$: La durée astronomique du jour.

\bar{H}_d : La composante diffuse.

\bar{H}_b : La composante directe.

ρ : L'albédo au sol.

β : L'angle d'inclinaison.

ω_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal.

ω'_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné.

I_{SC} : Le point du courant maximal.

V_{OC} : Le point de la tension maximale de la cellule.

PPM : Le point de fonctionnement optimal.

H_{MT} : La hauteur manométrique totale.

H_g : Hauteur géométrique.

ΔP : Pertes de charge.

Sl : Le niveau statique.

Dl: Le niveau dynamique.

Q : Débit.

C : Couple.

v : Vitesse (m/s).

m³ : Mètre cube.

CC : Courant continu.

AC : Courant alternative.

Ns : Module en série.

Np : Module en parallèle.

V : Voltage.

Kc : Coefficient de culture.

Etp : Evapotranspiration potentiel.

BNC : Besoin en eau des cultures.

Eh : Energie hydraulique.

C_h : Constante hydraulique.

g : La gravité terrestre.

ρ : Densité de l'eau.

Ee : Energie électrique.

ηMp : Le rendement du groupe motopompe.

η_{ond} : Le rendement d'onduleur.

Qh : Débit horaire.

Pc : La puissance de sortie du générateur.

ηg: Le rendement du générateur.

A : La surface active du générateur.

G : L'éclairement dans les conditions CSM.

CSM : les conditions standards de mesure.

η_{pv} : Le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation.

G_d : L'irradiation moyenne journalière.

β : L'inclinaison optimal des modules.

F_m : Facteur de couplage.

γ : Coefficient de température.

T : Température moyenne journalière des cellules.

W : Watt.

NOCT : Nominal operating cell temperature.

V : Vent.

H_r : Humidité relative de l'aire.

I_{ns} : Insolation.

V_j : Volume journalier mensuel d'eau d'irrigation.

C : Le coefficient de couvrage.

P_u : Pluie utile.

RFU : Dose pratique.

S : Surface.

e : Rendement de la méthode d'irrigation.

N_j : Nombre de jour du mois.

\bar{H}_{T0} : Rayonnement global journalier sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier.

N_b : Nombre de secteur d'arrosage.

L_0 : Longueur totale.

L_r : Longueur de la rampe.

Eg : Espace goutteur.

Ng : Le nombre de goutteurs par rampe.

Nr : Le nombre de rampe par secteur.

Nrpr : Le nombre total de rampe par porte rampe.

D : Diamètre.

Dnorm : Diamètre normalisé.

P : Pression.

Table des matières

Remerciements

Liste des abréviations

Résumé

Introduction général 1

Chapitres 1 : Étude du potentiel solaire algérien

1. Introduction	4
2. L'énergie solaire	4
2.1. Le soleil	5
2.2. Le mouvement de la terre autour du soleil	6
2.3. Principe de calcul de l'énergie solaire	7
2.3.1. Déclinaison	7
2.3.2. Le temps solaire vrai	8
2.3.3. La durée et le taux d'insolation	8
2.3.4. L'angle horaire	8
2.3.5. Position du soleil	8
2.4. Le rayonnement solaire	10
2.4.1. Le rayonnement solaire hors atmosphère	10
2.4.1.1. L'éclairement	11
2.4.1.2. L'irradiation journalière	11
2.4.1.3. L'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère ...	12
2.4.2. Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol	12
2.4.2.1. L'indice de clarté	13
2.4.2.2. L'irradiation diffuse sur une surface horizontale	14
2.4.2.3. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale	14

2.4.2.4. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée	14
2.4.3. L'albédo	15
3. Le gisement solaire	15
3.1. Définition	15
3.2. Le gisement solaire en Algérie	16
4. Le programme Algérien du développement des énergies renouvelables	18
5. Conclusion	19

Chapitres 2 : Étude des énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque

1. Introduction	21
2. Généralités sur les énergies non renouvelables	21
2.1. Définition d'une énergie non renouvelable	21
2.2. Impacts sur l'environnement et la santé	22
2.2.1. L'effet de serre	22
2.2.2. Pollution atmosphérique	22
2.2.3. Les pluies acides	22
2.2.4. Les marées noires	22
3. Les énergies renouvelables	22
3.1. Définition	22
3.2. Les différentes énergies renouvelables	23
3.2.1. L'énergie hydraulique	23
3.2.2. L'énergie biomasse	24
3.2.3. L'énergie géothermique	26
3.2.4. L'énergie éolienne	27
3.2.5. L'énergie solaire	28
3.2.5.1. Le solaire thermique	28
3.2.5.2. Le solaire photovoltaïque	30
3.2.5.2.1. Principe de fonctionnement	30
3.2.5.2.2. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	31

3.2.5.2.3. Les différentes technologies des cellules solaires	32
3.2.5.2.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque	33
4. Conclusion	33

Chapitres 3 : Étude du pompage solaire de l'eau

1. Introduction	35
2. Notions hydrauliques	35
2.1. Le débit Q	35
2.2. La hauteur manométrique totale HMT	35
3. Méthodes de pompages	37
3.1. Définition général du système de pompage d'eau	37
3.2. Méthodes de pompages photovoltaïques	38
3.2.1. Pompage avec batteries	38
3.2.2. Pompage au fil de soleil	38
4. Schémas et description du principe	39
4.1. Les types de pompes	41
4.1.1. La pompe volumétrique	41
4.1.2. La pompe centrifuge	42
4.1.3. Comparaison entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques...	44
4.2. Les types de moteurs	45
4.2.1. Moteur à courant continu	45
4.2.2. Moteur à courant alternatif	46
4.3. L'électronique de commande et de contrôle	47
4.3.1. Le convertisseur DC/DC (hacheur	47
4.3.2. Le convertisseur DC/AC (onduleur	47
4.4. Le générateur photovoltaïque	48
4.5. Définition générale d'une irrigation Goutte à Goutte	49
5. Dimensionnement complet de l'installation	50
5.1. Estimation des besoins en eau	50
5.1.1. Méthodologie	50

5.1.2. Modes de calcul	51
5.1.2.1. L'évapotranspiration.....	51
5.1.2.2. Les besoins en eau	52
5.2. Calcul des énergies quotidiennes requises.....	52
5.2.1. L'énergie hydraulique.....	52
5.2.2. L'énergie électrique	53
5.3. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	53
5.4. Dimensionnement de la pompe	53
5.5. Taille du générateur photovoltaïque	54
5.5.1. Méthode analytique	55
5.5.2. Méthode graphique	56
5.6. La procédure du dimensionnement.....	58
6. Conclusion.....	59

Chapitres 4 : Étude et dimensionnement d'un système de pompage solaire pour l'irrigation agricole à Ghardaïa

1. Introduction	61
2. Présentation de la zone d'étude	61
2.1. Situation géographique de Ghardaïa.....	61
2.1.1. La wilaya de Ghardaïa.....	61
2.1.2. La commune de Ghardaïa.....	62
2.1.3. L'URAER.....	62
2.2. Situation agricole de Ghardaïa	63
2.3. Caractéristique des sols de Ghardaïa	64
2.4. Ressources en eaux souterraines de Ghardaïa	65
2.4.1. La nappe du complexe Terminal	66
2.4.2. La nappe du continental intercalaire.....	66
2.5. Recensement des forages de Ghardaïa	67
2.6. Climatologie de Ghardaïa.....	67
2.6.1. La pluviométrie.....	68
2.6.2. La température	68
2.6.3. Le vent	69

2.6.4.	L'humidité relative de l'air.....	70
2.6.5.	L'insolation.....	70
2.6.6.	L'évapotranspiration.....	70
2.6.6.1.	L'évapotranspiration mesurée	70
2.6.6.2.	L'évapotranspiration sous environnement CROPWAT 8.0	71
2.6.6.2.1.	CROPWAT 8.0.....	71
2.6.6.2.2.	Evaluation numérique.....	71
3.	Dimensionnement.....	73
3.1.	Estimation des besoins en eaux	73
3.1.1.	Evaluation expérimental	73
3.1.2.	Evaluation Théorique	73
3.2.	Rayonnement solaire	75
3.3.	Hauteur manométrique Totale.....	75
3.4.	Dimensionnement de la station de pompage	75
3.5.	Choix de la pompe.....	76
3.6.	La capacité du réservoir.....	78
3.7.	Convertisseur DC/AC.....	78
3.8.	Taille du générateur	78
3.9.	Nombre de modules.....	80
3.9.1.	Nombre de modules en série	81
3.9.2.	Nombre de modules en parallèle	81
3.9.3.	Le schéma de branchement.....	82
3.9.4.	Correction de la puissance crête	82
3.10.	Le mode d'irrigation proposé	83
3.10.1.	Exigence de la culture.....	84
3.10.2.	Dimensionnement de la conduite principale	86
4.	Conclusion.....	87

Conclusion général 89

Références bibliographiques..... 91

Annexe 97

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Liste des jours types par mois proposé par Klein	14
Tableau 1.2 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie	19
Tableau 1.3 : Les programmes prévus des énergies renouvelables	21
Tableau 4.1 : Superficies des communes de la Wilaya	72
Tableau 4.2 : Occupation du sol de la wilaya de Ghardaïa	74
Tableau 4.3 : Exploitation de la nappe du CI à travers la Wilaya	77
Tableau 4.4 : Précipitation mensuelles de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)	78
Tableau 4.5 : Moyenne des températures (°C.) mensuelles de la région de Ghardaïa pour les dix années (2003-2012)	79
Tableau 4.6 : Moyenne mensuelles des vitesses de vent de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012).....	79
Tableau 4.7 : Moyenne mensuelles de l'humidité de l'air de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012).....	80
Tableau 4.8 : Moyenne mensuelles de l'insolation de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012).....	80
Tableau 4.9 : Evaporations mensuelles de l'humidité de l'aire de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années ((2003-2012).....	81
Tableau 4.10 : Les valeurs de l'Evapotranspiration de référence ET_0 (CROPWAT 8.0)	82
Tableau 4.11 : Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare	84
Tableau 4.12 : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle de Ghardaïa.....	85
Tableau 4.13 : Caractéristiques électriques d'une gamme de pompes PANELLI	87

Tableau 4.14 : Caractéristiques électriques de l'onduleur.....	89
Tableau 4.15 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque ISF-250	90
Tableau 4.16 : Calcule hydraulique du porte rampe.....	97
Tableau 4.17 : Le cycle de végétation des cultures	99

Liste des figures

Figure 1.1 : Les réserves d'énergie mondiale par rapport à la demande annuelle.....	5
Figure 1.2 : Structure du soleil.....	7
Figure 1.3 : Mouvement de la terre autour du soleil	8
Figure 1.4 : Position du soleil.....	11
Figure 1.5 : Evolution annuelle de la constante solaire	12
Figure 1.6 : Rayonnement direct, diffus et global	15
Figure 1.7 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	19
Figure 1.8 : Potentiel d'insolation de quelque pays de la région méditerranéenne.....	20
Figure 1.9 : Programme d'électrification solaire	22
Figure 2.1 : Schéma d'une Centrale hydraulique	28
Figure 2.2 : Schéma de principe d'une usine biomasse	29
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement de la Géothermie.....	31
Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'une turbine éolienne.....	32
Figure 2.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure 2.6 : Caractéristique courant- tension d'une cellule photovoltaïque	37
Figure 3.1: Hauteur manométrique totale	42
Figure 3.2: Système de pompage solaire	44
Figure 3.3: Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.....	45
Figure 3.4 : Installation type	47
Figure 3.5 : Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau	49
Figure 3.6 : Caractéristique d'une pompe Volumétrique.....	49
Figure 3.7 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples	50
Figure 3.8 : Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	51

Figure 3.9 : Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés (Solar pumping de IT Power.....	52
Figure 3.10 : Moteur à courant continu avec balais.....	53
Figure 3.11 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC	54
Figure 3.12 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC	55
Figure 3.13 : Groupement de N_s module en série et N_p en parallèle	56
Figure 3.14 : Schéma d'un réseau d'irrigation goutte à goutte	57
Figure 3.15 : Cycle d'évapotranspiration.....	59
Figure 3.16 : Variation journalière de l'ensoleillement.....	63
Figure 3.17 : Caractéristique de fonctionnement d'une pompe centrifuge	66
Figure 3.18 : Courbe caractéristiques d'une pompe centrifuge et dimensionnement PV	67
Figure 4.1 : Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa	72
Figure 4.2 : Situation géographique du champ	73
Figure 4.3 : La structure géologique de Ghardaïa	75
Figure 4.4 : Comparaison entre l'Evaporation mesurée et l'ETP calculée	82
Figure 4.5 : Caractéristiques électriques de la pompe 95PR8N/17.....	88
Figure 4.6 : Schéma de branchement.....	93
Figure 4.7 : Schéma du calcul de la taille du générateur	94
Figure 4.8 : Plan parcellaire du site	96
Figure 4.9 : Volume d'eau pompée et volume d'eau consommée	98

Introduction générale

L'Algérie est en Afrique du nord. Elle a pour voisin à l'Ouest le Maroc, le Sahara Occidental, et la Mauritanie. Le Mali et le Niger au Sud. La Libye et la Tunisie à l'Est. Au nord le pays s'ouvre sur la Méditerranée par une vaste façade maritime. C'est le plus grand pays du continent africain, avec 2 380 000 km². Le pays est divisé en 3 zones climatiques, le nord, les hauts plateaux et le grand sud (Sahara).

Jadis, pilier régional d'Afrique du Nord, l'Algérie été un pays à vocation agricole qui exporté ses produits agricoles en Europe. Cependant, aujourd'hui l'Algérie ne s'auto-suffit pas alimentaires et la part de l'agriculture dans le PIB est de 10 %. Le secteur de l'agriculture emploi 11% de la population. L'économie du pays est entièrement dépendante des hydrocarbures, 95,5 % des recettes dédiées à l'exportation proviennent du gaz et du pétrole. L'Algérie est le 9ème producteur de gaz au monde en 2014, et le 18ème en pétrole.

Depuis 2014 les exportations sont en baisse suite à la réduction de la demande mondiale, du fait de la stagnation économique, et aussi les grands gisements du pays sont de moins en moins productifs. La balance commerciale du pays est déficitaire depuis le début de l'année 2015. Le pays importe pratiquement tout ce qui consomme.

Pour y remédier à ce problème l'Algérie doit développer son agriculture pour s'auto-suffire à court terme et exporter à moyen et long terme. Aussi, étant un grand consommateur d'énergie, pays en plein expansion, l'Algérie doit aller vers une transition énergétique pour diversifier ses sources d'énergie.

Pour cela, l'Algérie s'est lancée dans un programme très ambitieux de développement des énergies renouvelables et en particulier celui du solaire photovoltaïque. Ceci, car l'Algérie possède un des plus importants gisements solaires au monde et pour préserver notre environnement et diminuer les émanations de gaz à effet de serre (CO₂). Ce type d'énergie n'est pas seulement inépuisable, mais aussi propre pour l'environnement.

La durée d'insolation EN Algérie peut atteindre les 3900 heures par an au le Sahara. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5KWh.

Notre travail de recherche n'est pas en marge de la politique algérienne. Il s'inscrit dans ce cadre bien déterminé l'agriculture et les énergies renouvelables. Notre sujet est le pompage solaire photovoltaïque pour l'irrigation du palmier dattier dans la région de Ghardaïa. Cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de site. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée pour la plupart des régions arides et semi arides en raison de l'existence dans ces régions d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond.

Dans le premier chapitre, nous avons donné des explications générales sur le gisement solaire et quelques notions fondamentales de physique et d'astronomie pour définir le potentiel solaire algérien. Celui-ci va nous permettre de définir l'inclinaison et la puissance électrique des panneaux photovoltaïques par rapport au site choisi.

Le deuxième chapitre a été dédié à l'étude et la définition des énergies renouvelables et en particulier au solaire photovoltaïque.

La composition générale d'un système de pompage photovoltaïque, ainsi que les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes sont présentés dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre a été entièrement consacré à une étude pratique de cas : le pompage solaire de l'eau pour l'irrigation dans la vallée de Ghardaïa. Nous avons dimensionné un système de pompage photovoltaïque fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil » pour irriguer une surface d'un hectare de palmiers dattier.

Chapitre I

Étude du potentiel solaire Algérien

1. Introduction :

L'énergie solaire est l'énergie la plus dominante de toutes les énergies renouvelables. Elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergie utilisées par l'homme. En plus elle est fournie par les rayons du soleil gratuitement. Alors pourquoi pas l'exploiter ! Sachant que l'Algérie est un vaste pays d'une superficie de 2.381.740 Km². Et grâce à sa position géographique, il dispose d'un potentiel solaire parmi les plus élevés au monde.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation. La connaissance de l'irradiation, la durée d'insolation et la position du soleil sont des données nécessaires pour l'étude de l'énergie interceptée au niveau de la terre. Celles-ci sont indispensables pour modéliser et simuler le fonctionnement d'un système énergétique et s'assurer de son intérêt et sa faisabilité.

2. L'énergie solaire :

L'énergie totale consommée annuellement par le monde entier, est fournie par le soleil dans un temps aussi court qu'une demi-heure. Pour une journée ensoleillée, les radiations solaires sur terre atteignent plusieurs milliers de Watts par mètre carré selon l'emplacement.

La Figure (1.1) représente l'intérêt et le potentiel de la source énergétique soleil comparativement aux autres sources d'énergie. Nous constatons que l'énergie solaire est inépuisable et que les autres sources sont en voie d'extinction. Il est donc très clair que l'on doit utiliser cette énorme source d'énergie inépuisable, d'autant plus qu'elle est verte. [12]

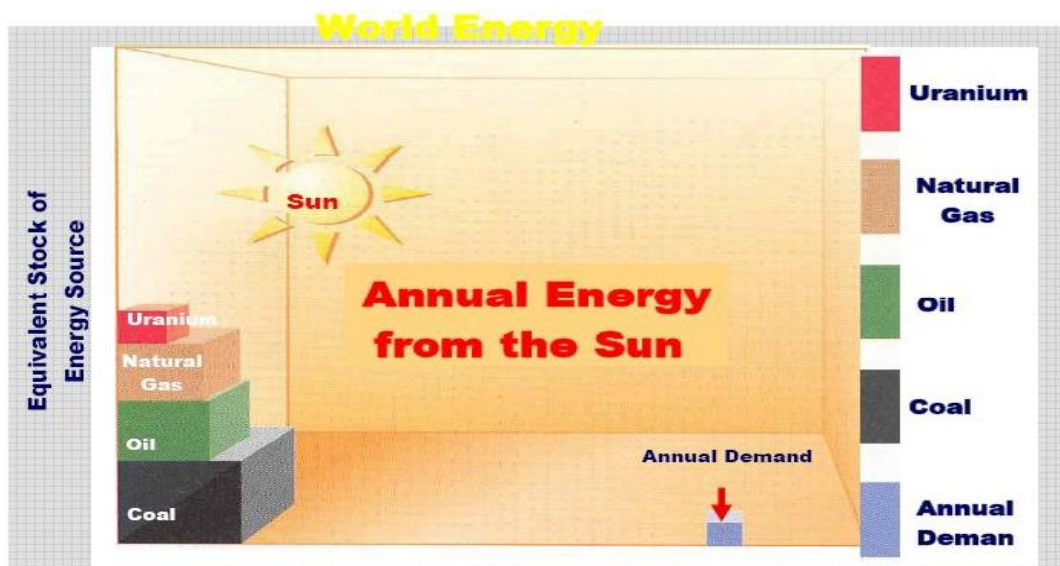


Figure 1.1 : Les réserves d'énergie mondiale par rapport à la demande annuelle [12].

2.1. Le soleil :

Le soleil est de constitution gazeuse. Étant l'étoile la plus proche de la terre, sa lumière met environ huit minutes pour nous atteindre. Il est à l'origine de toute vie sur terre en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie. De forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre et de masse de 2×10^{30} kg, il se compose principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments.

Il est situé à une distance de la terre égale à 150 millions de km. La puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} w. Seule une partie est interceptée par la terre. Elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ w. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques. 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère. Mais le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales (Fig 1.2) :

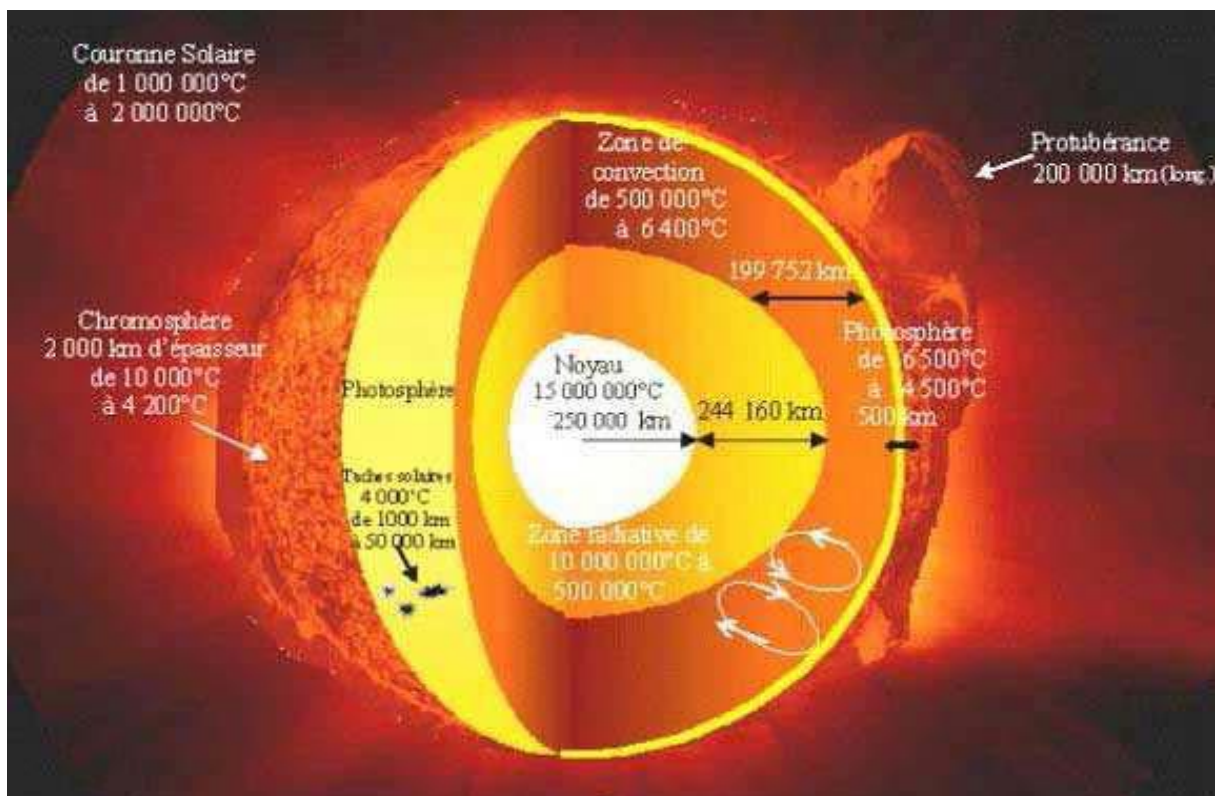


Figure 1.2 : Structure du soleil [1].

1- L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil. C'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire. Cette région s'étend sur une épaisseur de 25×10^4 km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

2- La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km. Elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient. C'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°C .

3- La chromosphère et la couronne solaire : Ce sont des régions à faible densité où la matière est très diluée. Elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y est très élevée (un million de degrés). [1], [2], [3]

2.2. Le mouvement de la terre autour du soleil :

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers. La révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil avec 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km. C'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne ; où le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique. Ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23,45^\circ$ [1].

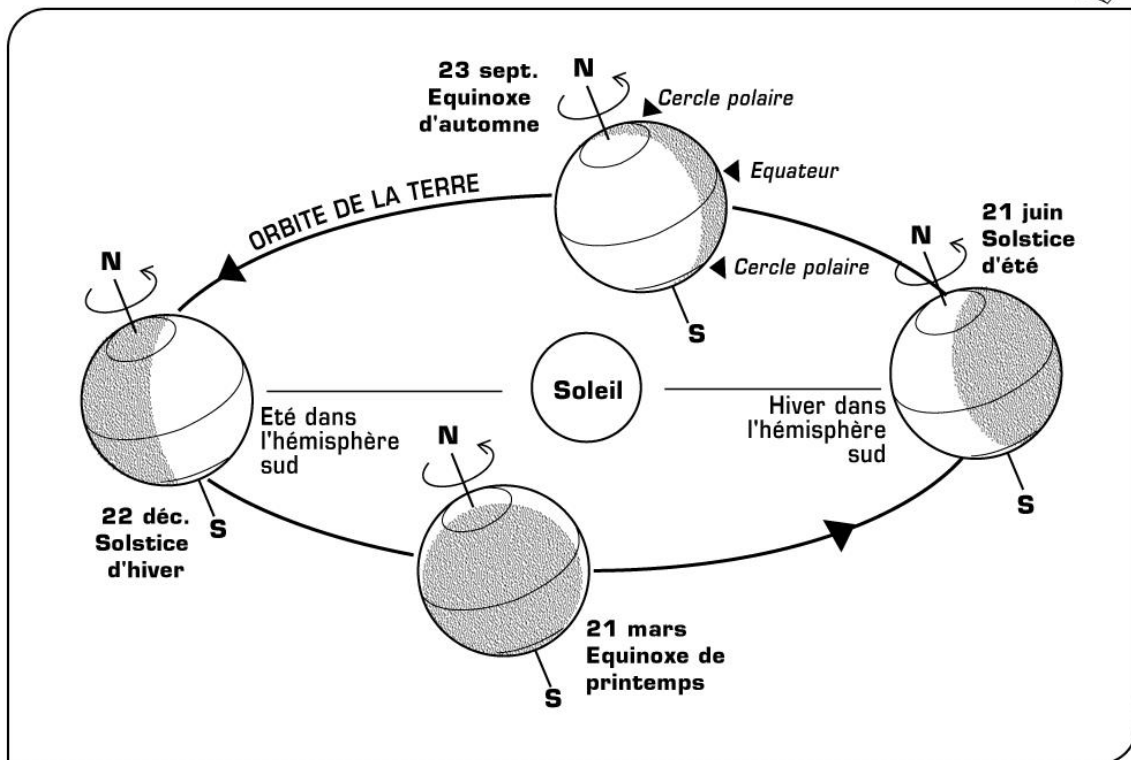


Figure 1.3 : Mouvement de la terre autour du soleil [2].

2.3. Principe de calcul de l'énergie solaire :

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

2.3.1. Déclinaison :

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. Sa valeur en degrés est donnée par l'équation de Cooper [15]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2 \left(2 * \pi \frac{284+n}{365}\right)\right) \quad (1.1)$$

Où

n est le numéro de jour dans l'année (c.-à-d. n = 1 pour le 1er janvier, n = 32 pour le 1^{er} février... etc.).

La déclinaison varie entre -23.45° (le 21 décembre) et $+23.45^\circ$ (le 21 juin). (Voir Figure 1.3).

2.3.2. Le temps solaire vrai:

Le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud) a été nommé temps solaire vrai, on note **TSV**. Le temps solaire vrai est donc un temps local puisqu'il est lié directement à la rotation de la terre sur elle-même [16].

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (1.2)$$

2.3.3. La durée et le taux d'insolation :

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement S_0 (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement S d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale.

Le taux d'insolation est donné par l'expression [15] :

$$\sigma = S/S_0 \quad (1.3)$$

La durée maximale S_0 est calculée par l'expression suivante :

$$S_0 = (2/15) \cos^{-1} (-\tan \psi \tan \delta) \quad (1.4)$$

Avec :

δ = La déclinaison

ψ = L'attitude du lieu

2.3.4. L'angle horaire :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local.

La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après midi et augmente de 15° par heure (donc un tour de 360° en 24 heures) [16].

2.3.5. Position du soleil :

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

-La hauteur de soleil (h): angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. Cette angle s'annule au lever et au cocher du soleil et prend sa valeur maximale au midi solaire.

(h) peut être déduite par la relation suivante :

$$\mathbf{Sin(h) = sin \psi . sin \delta + cos \psi .cos \delta .cos \omega} \quad (1.5)$$

L'angle horaire ω_s au lever de soleil s'obtient en écrivant $sin(h) = 0$ [15] :

$$\mathbf{cos \omega_s = - tan \psi tan \delta} \quad (1.6)$$

Où (δ) est la déclinaison et (ψ) la latitude du lieu.

- **Azimet du soleil (a) :** Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.

$$\mathbf{Sin(a) = \frac{cos(\delta)sin(\omega)}{cos(h)}} \quad (1.7)$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure (1.4).

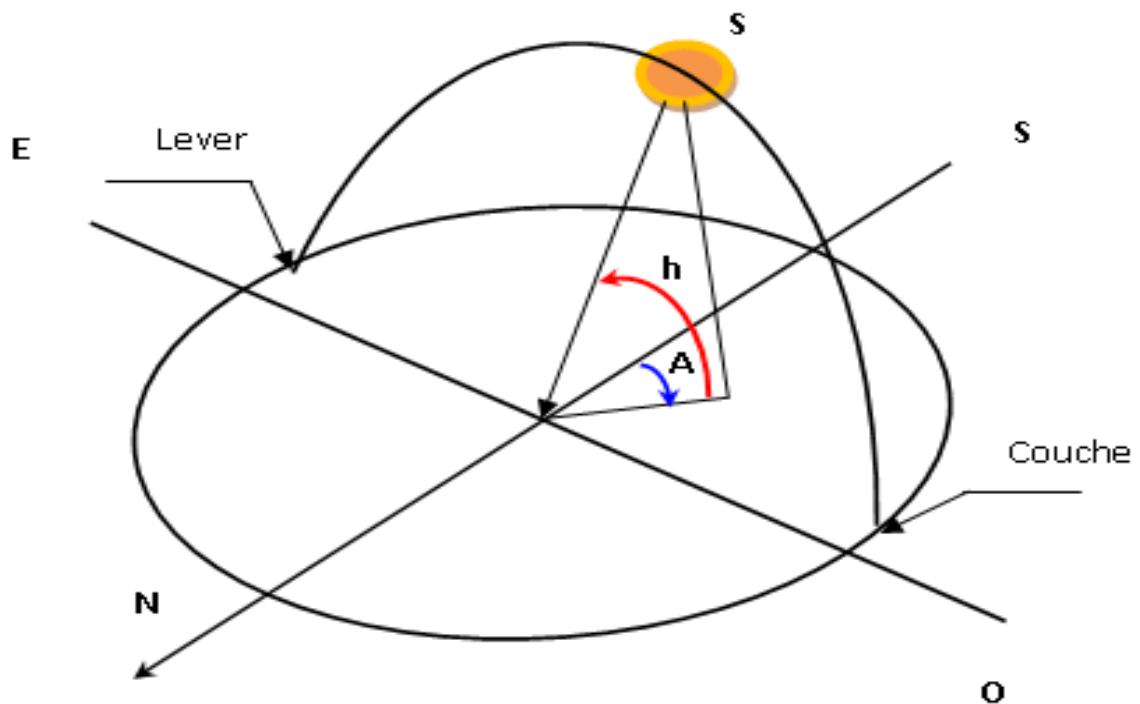


Figure 1.4 : Position du soleil [16].

2.4. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Il constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil.

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques [4].

La deuxième caractéristique du rayonnement solaire est sa répartition spectrale, qui est à peu près celle d'un corps noir à 5800°k. Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 micromètres à 4 micromètres [1] [4].

2.4.1. Le rayonnement solaire hors atmosphère :

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire [1] [4].

- **La constante solaire E_0** : est le flux énergétique reçu par une surface unité, normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère à une distance moyenne terre-soleil. La mesure de la constante solaire a fait l'objet de nombreuses expériences. Dans notre cas nous adopterons la valeur de 1353 w/m² ($\pm 1,5\%$). Ce flux, dit constante solaire varie cependant légèrement au cours de l'année, suivant les variations de la distance terre-soleil. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par la relation suivante :

$$E = E_0 \text{ EXP } [1+0,033 \cos (0,984 j)] \quad (1.8)$$

L'évolution annuelle de la constante solaire est représentée par la Figure (1.5) suivante :

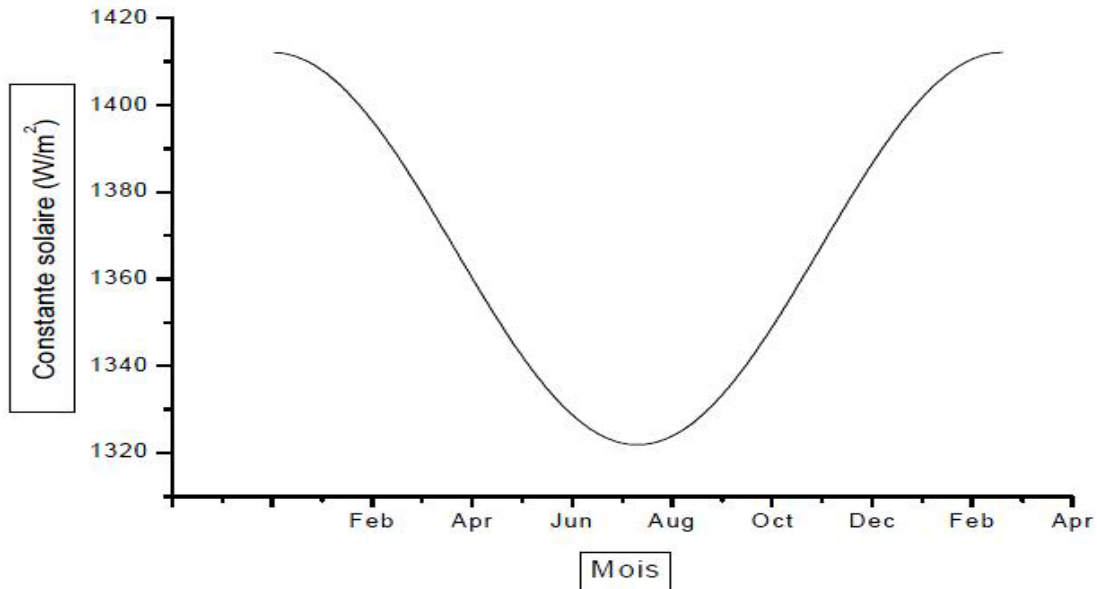


Figure 1.5 : Evolution annuelle de la constante solaire [5].

On remarque que le maximum est obtenu au mois de janvier avec la valeur 1413w/m², le minimum au début de juillet avec la valeur 1320w/m².

2.4.1.1. L'éclairement :

L'éclairement extraterrestre à la limite supérieure hors atmosphère, sur un plan horizontal, est calculé à partir de la constante solaire G_{sc} et de la facture de correction de la distance [17].

$$I = G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \psi \cdot \sin \delta) \quad [w/m^2] \quad (1.9)$$

Avec :

n : Le numéro de jour de l'année ($n=1$ pour le premier janvier, ...etc.)

G_{SC} : La constante solaire, $G_{SC} = 1367 [w/m^2]$.

2.4.1.2. L'irradiation journalière :

Pour un jour n donné, l'énergie reçue sur une surface horizontale H_0 est obtenue par l'intégration de l'équation précédente (de lever au coucher du soleil). On obtient [18] :

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot \left(1 + 0,033 \cos 2\pi \frac{n}{365}\right) (\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \psi \cdot \sin \delta) \quad (1.10)$$

Avec

L'angle solaire $\omega_s = \cos^{-1}(\tan \psi \tan \delta)$

G_{sc} : La constante solaire (w/m^2).

δ : La déclinaison du soleil.

ψ : Latitude de lieu.

n : Le numéro de jour de l'année compte à partir du le premier janvier.

2.4.1.3. L'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère :

Le jour type du mois : pour une grandeur donnée, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de cette grandeur.

La liste des jours types proposés par Klein [17] est représentée sur le tableau(1) suivant :

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Seb	Oct	Nov	Déc
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
N° de jour	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

Tableau 1.1 : Liste des jours types par mois proposé par Klein [17].

Pour calculer l'irradiation journalière moyenne mensuelle, on utilise l'équation précédente avec :

n : Le numéro de jour type du mois.

2.4.2. Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes [1] [4] :

a) Le rayonnement direct (S) : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

b) Le rayonnement diffus (D) : est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

c) Le rayonnement global (G) : est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

La figure (1.6) illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

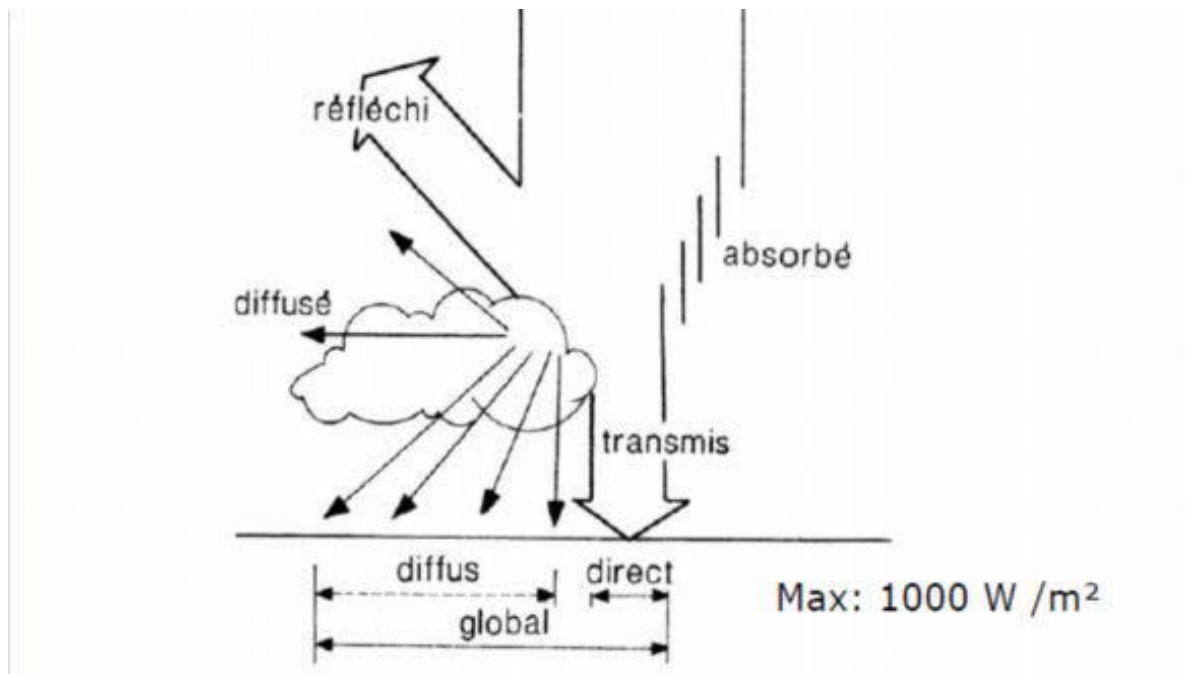


Figure 1.6 : Rayonnement direct, diffus et global [19].

2.4.2.1. L'indice de clarté :

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons [16] :

Indice de clarté journalière : $K_T = H/H_0$

Indice de clarté moyen mensuel : $K_T = \bar{H}/\bar{H}_0$

Les données H , \bar{H} sont les valeurs mesurées de l'irradiation globale (horaire, journalière et moyenne journalière) sur une surface horizontale. Ces données sont généralement disponibles

et peuvent être mesurées par Pyranomètre. Cependant, H_0 , $\overline{H_0}$ peuvent être calculées par des formules connues.

2.4.2.2. L'irradiation diffuse sur une surface horizontale :

On estime l'irradiation diffuse journalière moyenne H_d par la corrélation de Beeckman :

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = K_d = a + b.K_T \quad (1.11)$$

Pour le Sahara Algérienne [17] :

$$a=0,91$$

$$b=0,98$$

2.4.2.3. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale :

Avec :

$\overline{S}(h)$: La durée d'insolation moyenne journalière (mesurée)

$\overline{S_0}(h)$: La durée astronomique du jour (calculer par la relation (1.4))

Le taux d'insolation est calculé par [16] :

$$\overline{\sigma} = \frac{\overline{S}}{\overline{S_0}} \quad (1.12)$$

D'après la formule de black, l'indice de clarté est obtenu par :

$$K_T = b + c \overline{\sigma} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} \quad (1.13)$$

Les valeurs des constantes b et c sont données par Beeckman [17] pour la région saharienne en Algérie : $b= 0,3$, $c= 0,43$

2.4.2.4. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée :

Les panneaux solaires peuvent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud et à l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire.

Pour la conception des systèmes solaires, nous avons besoins de la moyenne journalière mensuelle de l'irradiation incidente sur un plan du capteur $\overline{H_T}$.

En utilisant le modèle de LIU et JORDAN, le calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée est donné par l'équation suivante [17]:

$$\overline{HT} = \overline{Hb} \cdot \overline{Rb} + \overline{Hd} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \overline{H} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (1.14)$$

Avec :

\overline{Rb} : Facteur de conversion donné par :

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\psi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega s' + \omega s' \cdot \sin(\psi - \beta) \sin\delta}{\cos\psi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega s + \omega s \cdot \sin\psi \sin\delta} \quad (1.15)$$

\overline{Hd} : La composante diffuse (calculer par la relation (1.9))

\overline{Hb} : La composante directe $\overline{Hb} = \overline{H} - Hd$

ρ : L'albédo au sol

β : L'angle d'inclinaison

ωs : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal

$\omega s'$: L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné

$\omega s' = \text{Min} [\omega s' \cdot \cos^{-1}(-\tan(\psi - \beta)\tan\delta)]$

$\omega s = \cos^{-1}(-\tan\psi \tan\delta)$

2.4.3. L'albédo :

Est la partie réfléchiée par le sol. Dépend de l'environnement du site. La neige par exemple renvoie énormément de rayons solaires alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun, il faudra tenir en compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. On définit l'albédo comme le rapport réfléchiée au sol par une surface et l'énergie incident par le soleil [19].

3. Le gisement solaire :

3.1. Définition :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [6].

3.2. Le gisement solaire en Algérie :

Grâce à sa position géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants dans le monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 1.2 selon l'ensoleillement reçu annuellement [7] :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	26500

Tableau 1.2. Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [7].

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé.

La figure (1.7) montre l'ensoleillement moyen annuel dans le monde.

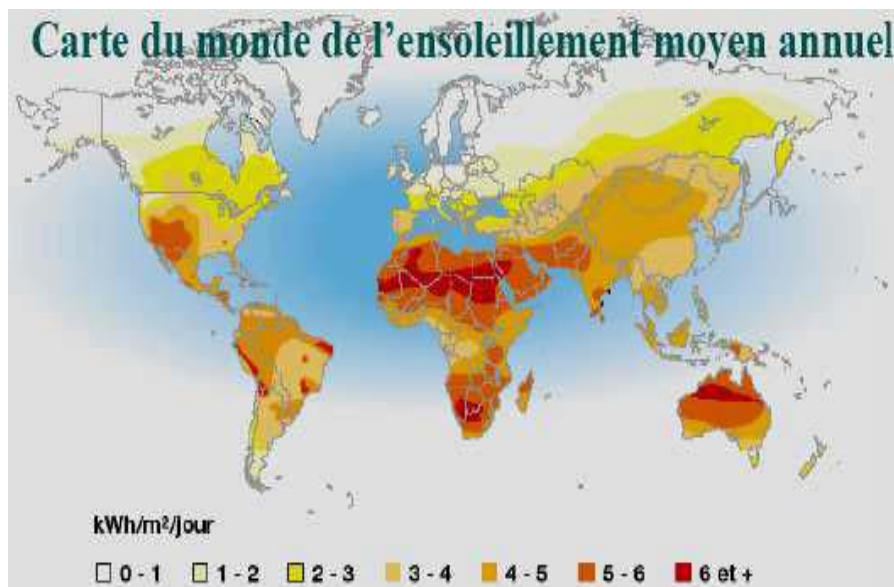


Figure 1.7 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [19].

Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe [8].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. [7]

La figure (1.8) nous montre le fort potentiel solaire d'Algérie par rapport à quelque la région pays méditerranéenne.

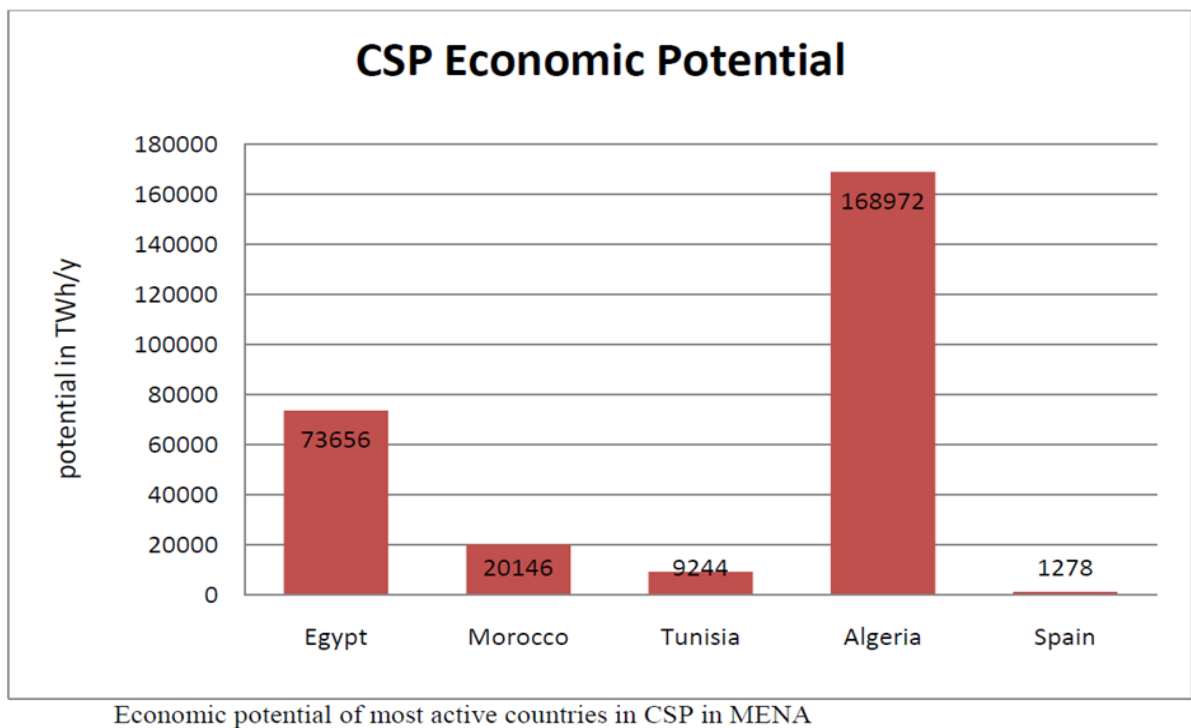


Figure 1.8 : Potentiel d'insolation de quelque pays de la région méditerranéenne [9].

4. Le programme Algérien du développement des énergies renouvelables :

Ce programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire. L'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants [14].

Le programme des énergies renouvelables revêt un caractère national et touche la majorité des secteurs d'activités. Sa mise en œuvre, placée sous l'égide de ministère de l'énergie et des mines, est ouverte aux opérateurs publics et privés.

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est répartie par filière comme suit :

Unité : MW	2015-2020	2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	5	10	15
TOTAL	4525	17475	22000

Tableau 1.3 : Les programmes prévus des énergies renouvelables [11].

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, le programme est prévus comme suite [9] :

2011-2013 : Réalisation de projets pilotes et test des filières.

2015 : Phase début de déploiement et fabrication des équipements.

2020-2030 : Phase de déploiement à grande échelle.

La figure (1.9) montre l'implantation pour les plus grands projets prévus

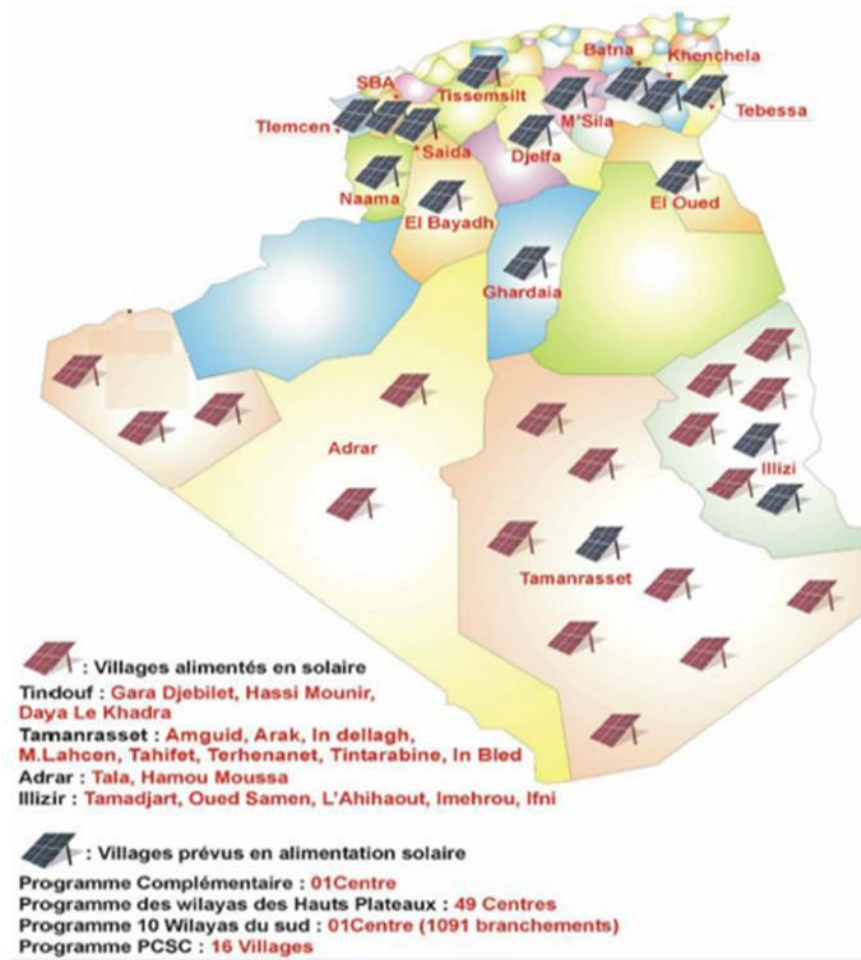


Figure 1.9 : Programme d'électrification solaire [9]

5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons parlé de quelque particularité du soleil. Nous avons montré l'immensité de l'énergie qui le constitue. Aussi nous avons défini quelques grandeurs astronomiques nécessaires pour notre étude. Ceci, dans le but de choisir d'une manière optimale l'angle d'inclinaison mensuelle et récupérer par la suite l'énergie maximale. Encore plus pratique et plus intéressant, l'énergie reste maximale en changeant l'inclinaison des panneaux que quatre fois par an (saisonnement). Nous avons aussi démontré l'importance du potentiel solaire en Algérie, parmi les plus importants au monde, qui peut représenter un énorme marché pour la technologie solaire photovoltaïque. Et enfin nous avons parlé du programme national Algérien prévus pour les énergies renouvelables.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

1. Introduction :

La consommation d'énergie sous toutes les formes à travers le monde, notamment les énergies fossiles, a atteint son extrémité. Cette augmentation de la consommation de l'énergie est due principalement à la croissance démographique et la forte consommation qui l'accompagne (transport, l'électrification...). Selon les experts, les échanges internationaux en énergie fossile occupent la part de lion par rapport à l'ensemble des autres échanges. Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, aux problèmes environnementaux et à l'augmentation considérable des besoins en énergie, le développement de nouvelles ressources énergétiques est l'une des priorités de la politique énergétique de beaucoup de pays. Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles. Leur exploitation permettrait de fournir de l'électricité aux sites isolés, et d'éviter la création de nouvelles lignes.

Le recours aux énergies renouvelables est impératif pour un pays comme l'Algérie qui dispose d'un climat favorable pour le développement du secteur des énergies renouvelables surtout dans la production d'électricité. L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique très important, notamment l'énergie solaire comme on a pu le voir dans le premier chapitre. Les énergies renouvelables (aussi appelées énergies vertes) correspondent à des sources d'énergie qui sont non seulement issues de phénomènes naturels, mais qui se régénèrent également par elles-mêmes, à l'aide de processus naturels indépendants des humains. Le soleil et la chaleur interne de la Terre font partie des sources d'énergie naturelles les plus importantes. Le fait qu'une ressource soit renouvelable ou non dépend aussi de la vitesse à laquelle celle-ci est consommé. Prenons par exemple, le bois tant que le nombre d'arbres coupés n'excède pas le nombre d'arbres qui poussent, le bois peut être considéré comme étant une ressource renouvelable. La question n'est donc pas seulement d'utiliser des énergies vertes, mais aussi de ne pas consommer l'énergie de façon abusive.

2. Généralités sur les énergies non renouvelables :

2.1. Définition d'une énergie non renouvelable :

Les énergies sont dites non renouvelables dans la mesure où elles sont incapables de se renouveler à l'échelle humaine. Ce sont des énergies de stock, aussi appelées des énergies fossiles car elles sont produites à partir de composés géologiques fossiles. Ces composés sont pour la plupart issus de la décomposition sédimentaire de matières organiques. Ils sont

principalement composés de molécules à base de carbone. Les principaux types des énergies fossiles sont : Le pétrole, le gaz naturel et le charbon. [20] [21].

2.2. Impacts sur l'environnement et la santé :

2.2.1. L'effet de serre :

L'exploitation des différentes énergies fossiles produisent des gaz toxiques : le dioxyde de carbone, le méthane, l'azote... Ces gaz ont pour effet d'augmenter la température (en 2040 +3°). A long terme, les océans augmenteront de volume, les plaines côtières fortement peuplées seraient menacées, des surfaces agricoles disparaîtraient et produiraient moins de nourriture pour l'homme.

2.2.2. Pollution atmosphérique :

La combustion du charbon et du pétrole dégage des oxydes d'azote, de soufre et de carbone. Cette pollution provient essentiellement des transports. A certaine période, dans des grandes villes, on parle de pic de pollution, mettant en danger la santé des citoyens.

2.2.3. Les pluies acides :

Lorsque les oxydes de soufre et d'azote se combinent avec l'eau atmosphérique, les acides se forment et sont responsables de la mort de million d'hectares de forêt.

2.2.4. Les marées noires :

Les défaillances de la production et des transports de pétrole provoquent des marées noires qui polluent et tuent de nombreuses espèces animales et végétales [22].

3. Les énergies renouvelables :

3.1. Définition :

Les énergies sont dites renouvelables dans la mesure où elles sont capables de se renouveler assez rapidement. Ces énergies sont parfois considérées comme inépuisables à l'échelle du temps (échelle humaine) [23].

3.2. Les différentes énergies renouvelables :

3.2.1. L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [24]. C'est l'une des sources d'énergie les plus utilisées dans le monde, elle représente environ 19% de l'électricité produite dans le monde bien que tout son potentiel énergétique ne soit pas encore totalement exploité [25].

On distingue plusieurs types de l'énergie hydraulique [26] :

- Energie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues.
- Energie marémotrice : issue du mouvement de l'eau créé par les marées (variation du niveau de la mer, courants de marée)
- Energie hydrolienne : les hydroliennes utilisent les courants sous marins.
- Energie thermique des mers : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
- Énergie osmotique : la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie.

L'énergie potentielle des cours d'eau est fonction du débit et de la différence de niveau entre l'amont et l'aval de la centrale (hauteur de chute). La production électrique de cette filière dépend fortement du régime des précipitations. L'énergie hydraulique est exploitée grâce à des barrages.

Les centrales hydrauliques sont dites de basses chutes si elles sont situées sur un grand fleuve ayant une faible pente mais un très fort débit. L'électricité est donc produite en continue. Des barrages sont installés permettant ainsi de dériver l'eau vers la centrale. Des écluses sont également installées afin de ne pas interrompre le trafic fluvial.

Une fois l'eau placé dans la centrale, on déplace les aubes du distributeur qui est ensuite amené sur une turbine d'un type Kaplan. Cette turbine est constituée de "palle" ayant une orientation aidant à avoir un bon rendement.

Grâce à sa rotation, la turbine entraîne un alternateur qui produira l'électricité. Pour finir, l'énergie produite est envoyée vers un réseau de transfert d'électricité par l'intermédiaire d'un transformateur [27].

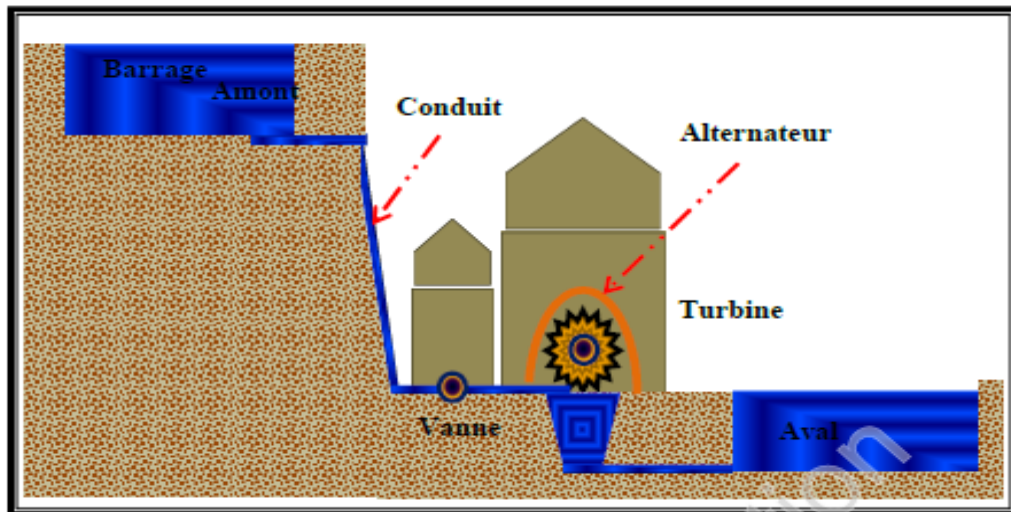


Figure 2.1 : Schéma d'une Centrale hydraulique [27].

3.2.2. L'énergie biomasse :

Issue d'une matière organique qui a fermenté, produit du gaz qui peut être utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Les centrales à biomasse fonctionnent grâce aux déchets forestier, agricole ou encore aux ordures ménagères.

Il existe trois familles pour la biomasse :

- La biomasse lignocellulosique, (ou lignine) comprenant principalement le bois, les résidus verts, ainsi que la paille. Leur utilisation est faite à partir d'une combustion, ou conversions thermochimiques.
- La biomasse à glucide, utilisant la canne à sucre, les céréales et les betteraves sucrières. On favorise ces constituants par une méthanisation (C'est un processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène), ou encore par distillation, conversions biologiques.
- La biomasse oléagineuse, qui est riche en lipide. Ses composants sont le colza, ainsi que le palmier à huile. Cette catégorie de biomasse est appelée "Biocarburants". Ces carburants sont récoltés suite à de nouvelles transformations chimiques, et en ressort sous deux formes : Les esters d'huile végétale, et sous la forme de l'éthanol.

C'est matériaux sont employer en tant que combustibles dans la production de la chaleur, de carburants ou même d'électricité. En écologie, on dit souvent que la biomasse est la masse totale (en quantité de matières) de toutes les espèces vivant dans un milieu naturel donné.

Les principaux utilisateurs de cette énergie biomasse, sont les Etats-Unis, avec 30,7% de production a l'échelle mondiale, juste devant l'Allemagne.

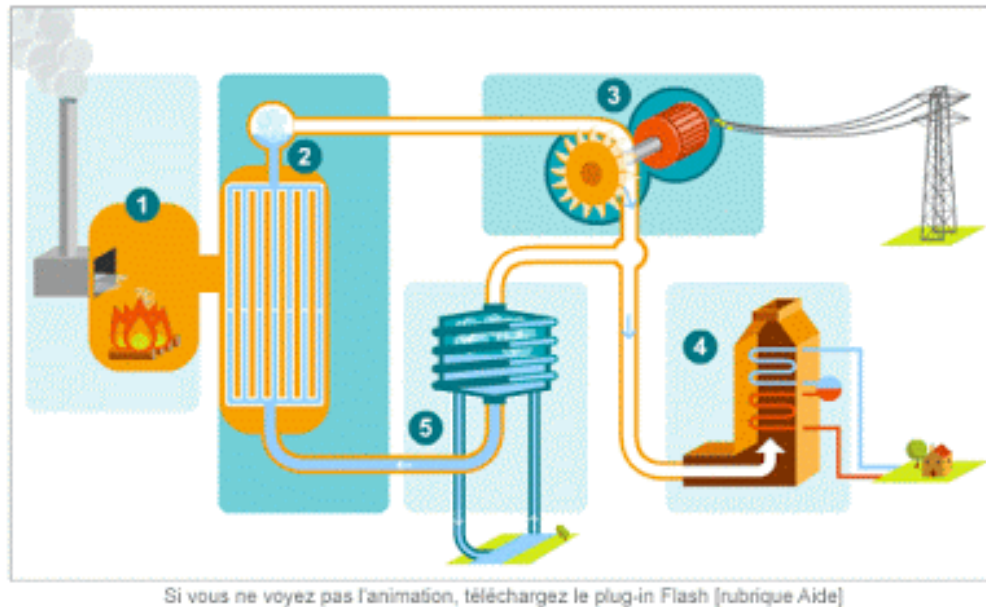


Figure 2.2 : Schéma de principe d'une usine biomasse [28].

Les étapes de production de l'énergie biomasse [28] :

1. La combustion : La biomasse brûle dans une chambre de combustion en dégageant de la chaleur.
2. La production de vapeur : La chaleur transforme l'eau de la chaudière en vapeur.
3. La production d'électricité : La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité transportée dans les lignes.
4. La production de chauffage : A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est utilisée pour le chauffage grâce à un cogénérateur.
5. Le recyclage : Le reste de la vapeur est transformée en eau grâce à un condenseur.

3.2.3. L'énergie géothermique :

Consiste à trouver des nappes d'eau chaude d'environ 55 à 80°C que les villes pompent afin d'utiliser cette chaleur avant de la renvoyer dans ces mêmes nappes. C'est une énergie dite propre et renouvelable, bien que son renouvellement ne soit pas aussi immédiat que le renouvellement des énergies solaire et/ou éolienne. Cette énergie désigne l'industrialisation de l'utilisation de la chaleur et les phénomènes thermiques sur la Terre. Des capteurs sont enterrés à plus de 1800 mètres en dessous du sol servant à récolter l'énergie située dans l'eau ou dans le sol. Une fois récupérée, elle est distribuée dans les habitations de petites tailles sous forme de chauffage. Une fois utilisée, elle sera renvoyée sous la terre par un forage de réinjection (figure2.3) [28].

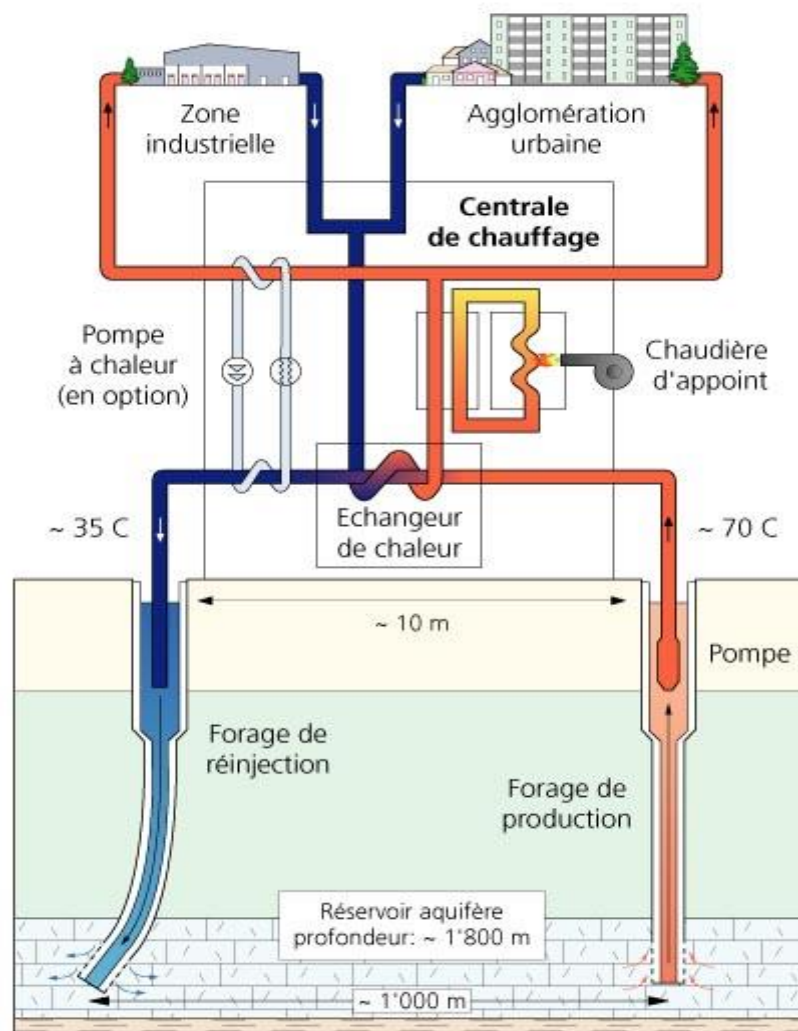


Figure 2.3 : Principe de fonctionnement de la Géothermie [28].

3.2.4. L'énergie éolienne :

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante [24].

L'exploitation de l'énergie éolienne repose sur un principe simple. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales, elle est d'abord transformée en énergie mécanique de rotation avant d'être convertie en électricité par un générateur.

Une éolienne moderne raccordée au réseau est composée d'une hélice à deux ou trois pales du rotor, du moyeu, de l'arbre, du générateur, du mât, de la fondation et du raccordement au réseau.

Le rotor entraîné par le vent va faire tourner l'arbre qui lui-même entraînera la mécanique d'une génératrice, qui, elle produira de l'électricité [29].

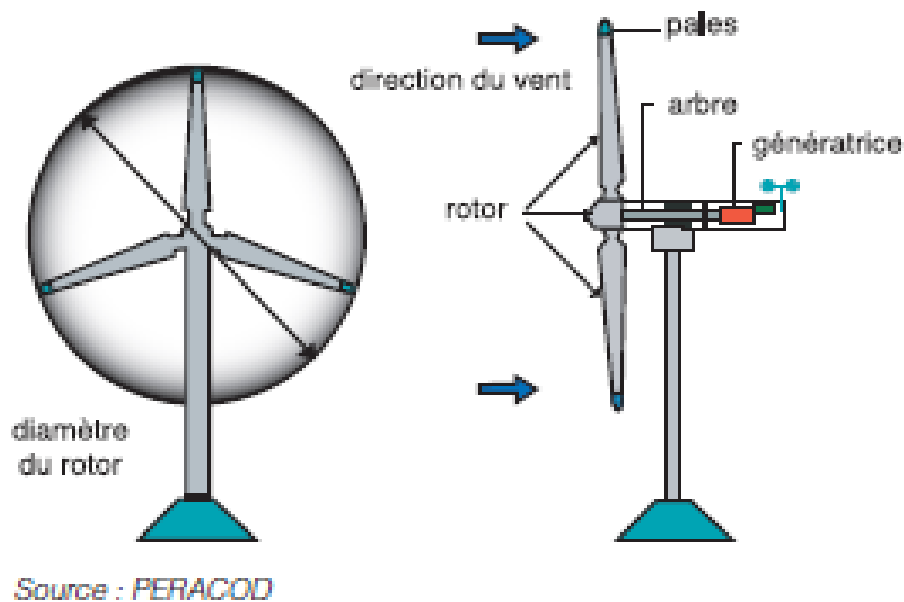


Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'une hélice éolienne [29].

3.2.5. L'énergie solaire :

Le soleil, source énergétique quasi-illimitée, est à l'origine d'un nombre impressionnant d'effets biologiques qui participent directement ou indirectement à la vie quotidienne (chaleur et lumière) [26]. C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuit et inépuisable. Elle fournit toutes les 50 minutes de quoi répondre à la consommation annuelle des habitants de la Planète. Le défi est de recueillir une part, même infime, de cette énergie calorifique et rayonnante.

Deux grandes technologies ont été identifiées pour en tirer le meilleur profit : La première permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques qui transforment directement le rayonnement du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs, l'autre à partir des centrales solaires thermiques qui captent la chaleur du soleil. La chaleur collectée est utilisée comme telle ou bien transformée en énergie mécanique, puis en électricité. Dans ce dernier cas, on parle de solaire thermodynamique [30] [31].

3.2.5.1. Le solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à produire de la chaleur à partir des rayons du soleil et à utiliser celle-ci directement. Il s'agit de dispositifs opérant à basse température (moins de 100 °C) pour les usages de l'habitat et du secteur tertiaire (eau chaude sanitaire et chauffage) et pour les divers besoins de l'industrie. C'est aujourd'hui la part prépondérante du solaire dans le monde.

On utilise des capteurs thermiques, destinés à absorber la chaleur solaire et à la restituer à un fluide caloporteur qui circule vers les lieux d'utilisation. Différents types de capteurs vont des plus simples pour les usages domestiques aux plus sophistiqués pour les installations industrielles.

Dans les utilisations les plus courantes, il s'agit de capteurs plans, composés d'un corps noir absorbant le rayonnement solaire, d'un isolant thermique et d'une vitre assurant l'effet de serre. L'élévation de température par rapport à l'air ambiant peut atteindre +70 °C. Il existe aussi des capteurs à air (pour le séchage agricole par exemple) et des capteurs non vitrés, en caoutchouc ou en plastique, utilisés notamment pour chauffer les piscines. Les capteurs sous vide sont adaptés aux applications industrielles nécessitant de hautes températures (nettoyage d'abattoirs, pasteurisation de conserves, etc.). Ils sont constitués de tubes en verre

mis sous vide (pour une isolation thermique optimale). À l'intérieur, un récepteur (appelé absorbeur) capte l'énergie solaire et la transfère au fluide.

Le solaire thermodynamique consiste à concentrer le rayonnement solaire (on parle d'énergie solaire concentré – ESC) à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide caloporteur (gaz, huiles, sels fondus...) à haute température. Il échange sa chaleur avec un réseau d'eau, dont la vapeur fait tourner une turbine (énergie mécanique) qui produit de l'électricité.

La collecte du rayonnement solaire est assurée dans de grandes centrales composées de miroirs plans ou paraboliques, disposés sur de vastes espaces. La technologie est adaptée aux pays où le rayonnement est intense, par exemple les espaces désertiques [31].

Il existe trois filières de l'énergie thermique :

- **Les filières cylindro-parabolique :**

Elles se fonctionnent avec des miroirs cylindro-parabolique d'orientation est-ouest (dans ce cas le mouvement de suivi du soleil se limite à une orientation si lente qu'elle peut être assurée dans automatisme), ou nord-sud, ce qui suppose toujours une rotation unique, mais à plus grande vitesse et qui doit donc être automatisée.

Les avantages recherchés par cette technique portent surtout sur la simplification de la motorisation et de la commande du mouvement. En substance, le passage de deux axes à un seul.

- **Les filières paraboliques :**

Dans ce cas, le récepteur est une chaudière à gaz (hydrogènes ou hélium) fonctionnant entre 600 C et 800 C. Plusieurs réalisations mettent en œuvre de telle chaudière ou ouverture étroites (autorisée par le haut niveau de concentration de l'optique). Il y a aussi des chaudières à tube métalliques de tout petit diamètre. Mais des recherches portent sur des nouvelles technologies pour augmenter le rendement de ce type de filières.

- **Les filières centrales à tour :**

Dans ce type de filières, au moins quatre fluides caloporteurs sont susceptibles d'être utilisés : l'eau-vapeur, les sels fondus, les métaux liquides et l'air. Les récepteurs à utiliser sont différents dans ces quatre cas [26].

3.2.5.2. Le solaire photovoltaïque :

3.2.5.2.1. Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique) consiste à convertir de la lumière en électricité. Il a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839 et a reçu une application industrielle à partir de 1954.

Le courant électrique est un déplacement d'électrons. Pour provoquer ce déplacement, les photons (particules constitutives de la lumière) vont exciter les électrons périphériques de certains atomes d'éléments semi-conducteurs.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [32] [33].

Dans un module photovoltaïque, la charge est connectée entre deux couches de contact électrique, l'une à l'arrière du panneau et l'autre au dessus.

L'énergie produite par les rayonnements est séparée en charges positives et négatives, qui peuvent être utilisées aux deux pôles des cellules comme une batterie.

Pour obtenir de meilleurs rendements, de nombreuses cellules solaires vont être assemblées et reliées. Le dessus du panneau est revêtu d'une couche antireflet afin que la lumière entrante ne soit pas réfléchiée mais absorbée par les couches semi-conductrices du panneau. Tous les panneaux photovoltaïques comprennent ces deux sortes de semi-conducteurs, l'une avec des électrons positifs et l'autre avec des électrons négatifs. La surface de ces panneaux est polie [29].

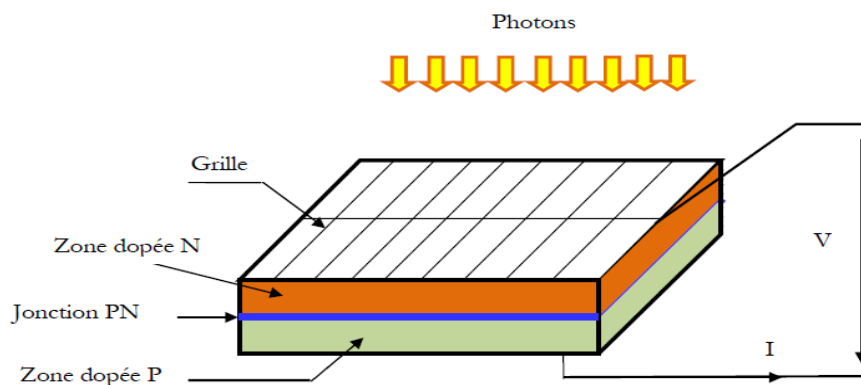


Figure 2.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque [16].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [29].

3.2.5.2.2. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque :

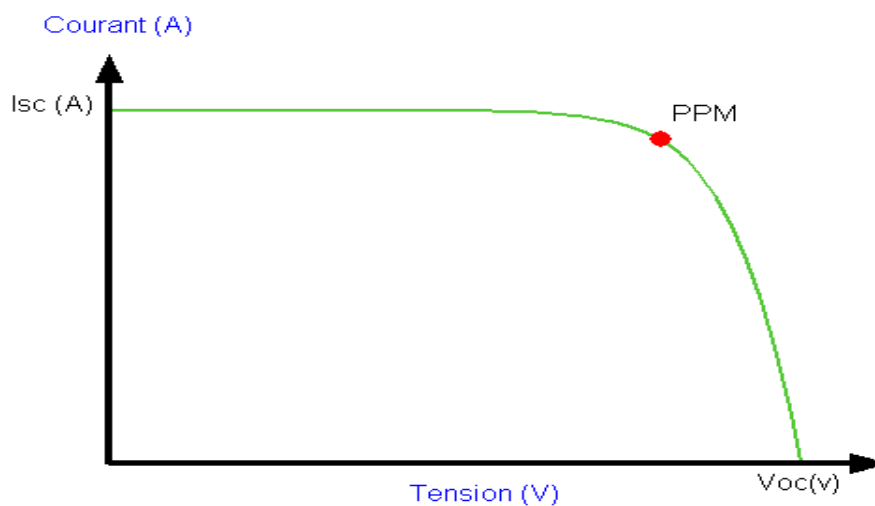


Figure 2.6 : Caractéristique courant- tension d'une cellule photovoltaïque [16].

Comme nous le voyons sur la figure (2.6), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe $I(V)$ non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température.

Il y a trois points importants sur cette courbe :

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal (I_{SC}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court circuit (I_{SC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- Le point de la tension maximale de la cellule (V_{OC}) (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}).

3.2.5.2.3. Les différentes technologies des cellules solaires :

Dans ce système, des lentilles ou des miroirs paraboliques sont utilisés pour concentrer le rayonnement solaire sur les panneaux. Le composant principal de ce système est le Silicium, et donc le rendement se diffère en fonction de type de silicium. Actuellement, il existe trois types de Silicium [34]:

- **Silicium monocristallin:**

Matériau le plus répandu, présentant le meilleur rendement (12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Il est caractérisé par :

- ❖ Puissance des panneaux : 5 à 300 W_c ,
- ❖ Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m^2 ,
- ❖ Usage : tous usage en extérieur de forte et moyenne puissance (télécom, habitat, centrales et toit solaires).
- ❖ Coût élevé.

- **Silicium poly (ou multi-) cristallin:**

Une conception plus facile, un coût de fabrication moins important et un rendement plus faible (11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire). Il est caractérisé par :

- ❖ Puissance des panneaux : 5 à 300 W_c ,
- ❖ Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m^2 ,
- ❖ Usage : silicium cristallin.

- **Silicium amorphe :**

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents avec un rendement de 5% à 8%, 13% en laboratoire. Ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements (extérieur et intérieur), il est caractérisé par :

- ❖ Puissance de photopiles intérieures : 0 à 1 W_c ,
- ❖ Puissance des panneaux extérieurs : 0.5 à 90 W_c ,
- ❖ Gamme d'éclairement : 20 à 1000 W/m^2 ,
- ❖ Usage : électronique professionnelle et grand public, électronique de faible consommation en extérieur, centrales au sol.

3.2.5.2.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par [34]:

a. Les cellules solaires : Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V.

b. Les modules : La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

c. Le générateur photovoltaïque : L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque qui est considérée comme une énergie propre et durable. Le recours à cette énergie est certainement un progrès, tant en termes d'impacte sur l'homme que sur la planète.

L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable de toutes, facile à mettre en œuvre et à entretenir. C'est une technologie qui favorise le développement humain et améliore le niveau de vie des habitants, le plus souvent mal électrifié.

Enfin, la production d'électricité par un générateur photovoltaïque n'émet pas de gaz à effet de serre et ne génère aucune pollution comparable à celle des énergies fossiles. C'est donc une énergie fiable, propre et durable.

Chapitre 3 : Étude du pompage solaire de l'eau

1. Introduction :

De nos jours, la demande d'eau est de plus en plus importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile voir pratiquement impossible. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et avec un bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer, avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

Ce chapitre traite plus particulièrement les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes [16].

2. Notions hydrauliques :

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite [35].

2.1. Le débit Q :

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en mètre cube par jour (m^3/j).

2.2. La hauteur manométrique totale H_{MT} :

La hauteur manométrique totale (HMT) est calculée à partir du niveau statique du puits ou du forage, additionné de la hauteur du réservoir et des pertes de charges dues à la tuyauterie. En général, on rajoute 10% à la hauteur physique pour ces pertes de charge. Ces hauteurs peuvent être calculées comme suite [36] [37] :

$$H_{MT} = H_g + P_c \quad (3.1)$$

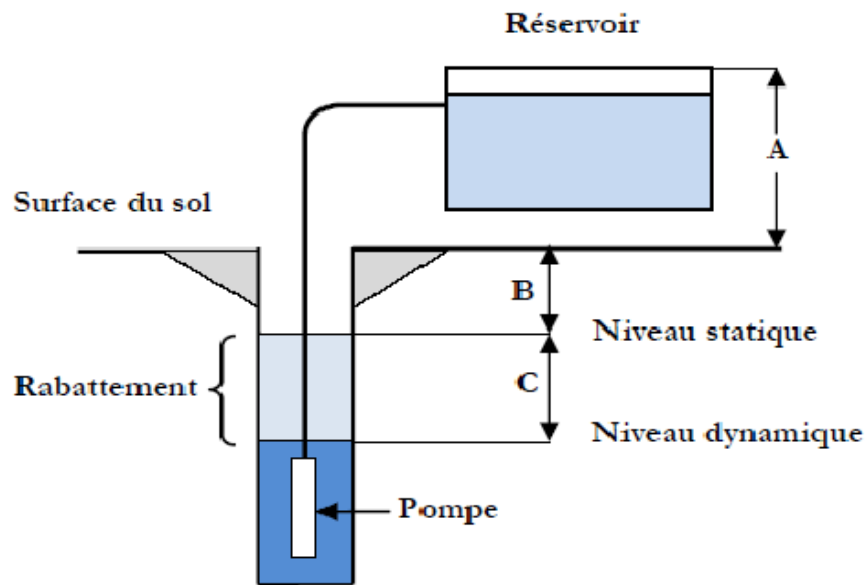


Figure 3.1: Hauteur manométrique total [16].

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (voir Figure 1). Elle est calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{H_g = A + B + C} \quad (3.2)$$

ΔP : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites (D), de leur diamètre et du débit de la pompe.

SI : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau avant pompage.

DI : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement.

Rabattement : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

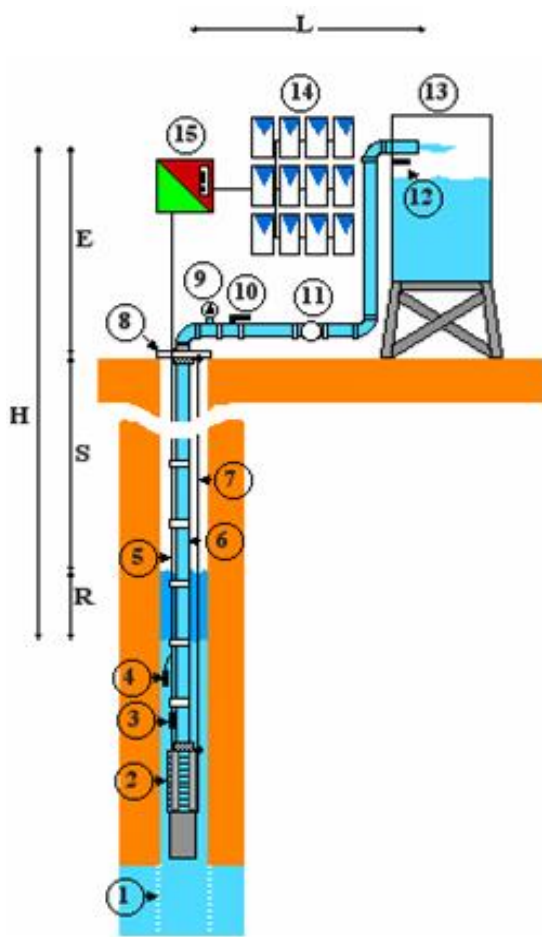
Rabattement maximal : est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

3. Méthodes de pompages :

3.1. Définition général du système de pompage d'eau :

La différence entre un système de pompage solaire et un système de pompage classique est l'utilisation de panneaux photovoltaïques [14], d'un convertisseur [15] et d'une pompe adéquate [2] (voir fig 3.2). Les pompes utilisées peuvent être de surfaces ou immergées, centrifuges ou volumétriques selon la condition d'utilisation :

Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne, avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, le pompage sans batterie, plus communément appelée « pompage au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [36] [38] [39].



N°	Désignation
1	crépine du forage
2	pompe
3	épissures
4	détecteur niveau bas
5	câblage électrique
6	canalisation
7	élingue de sécurité et de manutention
8	tête de puits
9	manomètre
10	vanne
11	compteur
12	détecteur réservoir plein
13	réservoir
14	panneaux photovoltaïques
15	convertisseur
H	Hauteur
E	Elévation
S	Niveau statique
R	Rabattement
L	Distance horizontale réservoir pompe
Φ	Diamètre canalisation

Figure 3.2: Système de pompage solaire [38].

3.2. Méthodes de pompages photovoltaïques :

3.2.1. Pompage avec batteries :

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée peut être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieurs. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie [39].

3.2.2. Pompage « au fil du soleil » :

L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au dessus du sol pour qu'elle soit distribuée par gravité au besoin. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles.

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. Néanmoins, celle-ci présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger :

- Il est impossible de pomper au-dessous d'un certain niveau d'éclairement. La pompe ne pouvant être amorcée sous une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée.
- Parce que le rendement des pompes diminue en dehors de leur puissance nominale de fonctionnement, le système nécessitera l'utilisation d'un adaptateur de charge. Ceci est particulièrement nécessaire pour les pompes volumétriques.
- Le débit de la pompe ne sera pas constant et le rabattement du puits ou du forage peut être trop élevé durant certaines périodes de la journée.

Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie

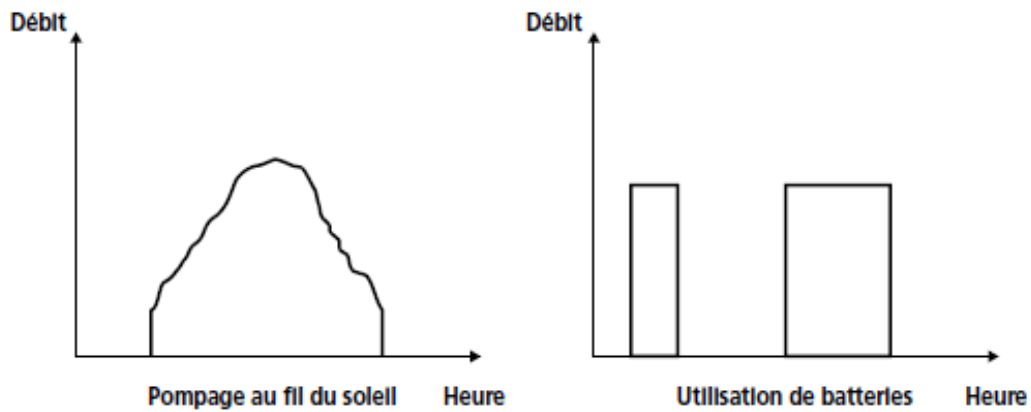


Figure 3.3: Caractéristique du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie [38].

4. SCHEMAS ET DESCRIPTION DU PRINCIPE :

Les panneaux solaires photovoltaïques (1) produisent l'énergie électrique sous forme d'un courant continu qui est converti à travers un convertisseur statique (3) pour alimenter un groupe motopompe immergé ou flottant (4). Le groupe motopompe est composé d'un moteur à courant alternatif mono, bi ou triphasé ou à courant continu à commutation électronique qui est couplé à une pompe centrifuge à étages multiples ou à une pompe volumétrique ou autre suivant le débit recherché.

Un système de pompage PV se compose généralement [36] [7] :

- ✓ D'un générateur photovoltaïque, composé de modules photovoltaïques.
- ✓ D'un coffret de commande qui peut contenir selon le cas :
 - Un simple interrupteur.
 - Un adaptateur d'impédance.
 - Un onduleur.
 - Une carte électronique de commande.
- ✓ D'un groupe motopompe.
- ✓ La partie stockage.

Les systèmes proposés sont composés de modules photovoltaïques montés sur un châssis de support (2) incliné suivant la latitude du site afin d'optimiser la production photovoltaïque,

ou rotatif suivant la course du soleil. Le dispositif est complété par le convertisseur statique (3) monté en surface et qui permet la conversion du courant continu produit par le champ solaire en courant alternatif ou continu pour alimenter le moteur couplé à la pompe (Fig 3.4).

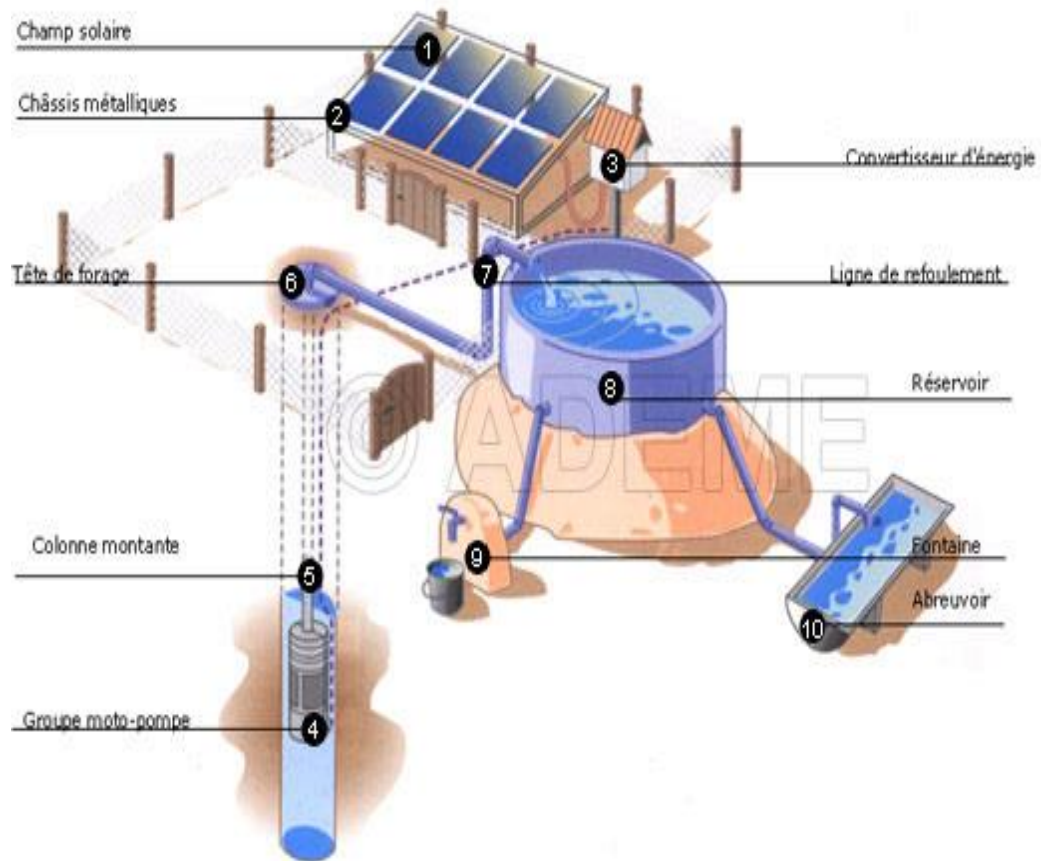


Figure 3.4 : Installation type [44].

4.1. Les types de pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement ; soit de type volumétrique ou centrifuge. On distingue en outre deux manières de faire fonctionner les pompes ; soit par aspiration soit par refoulement. Les pompes par

aspiration doivent être installées à une hauteur inférieure à 10 mètres par rapport au niveau de l'eau pompée et il faut prévoir un dispositif d'amorçage. Les pompes à refoulement sont, soit immergées avec le moteur (forme monobloc), soit avec moteur en surface (avec arbre de transmission). [35] [36] [37]

4.1.1. La pompe volumétrique:

Transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions. Mais elles ne conviennent que pour des débits faibles, ce qui rend leur emploi très limité pour l'alimentation en eau des cultures.

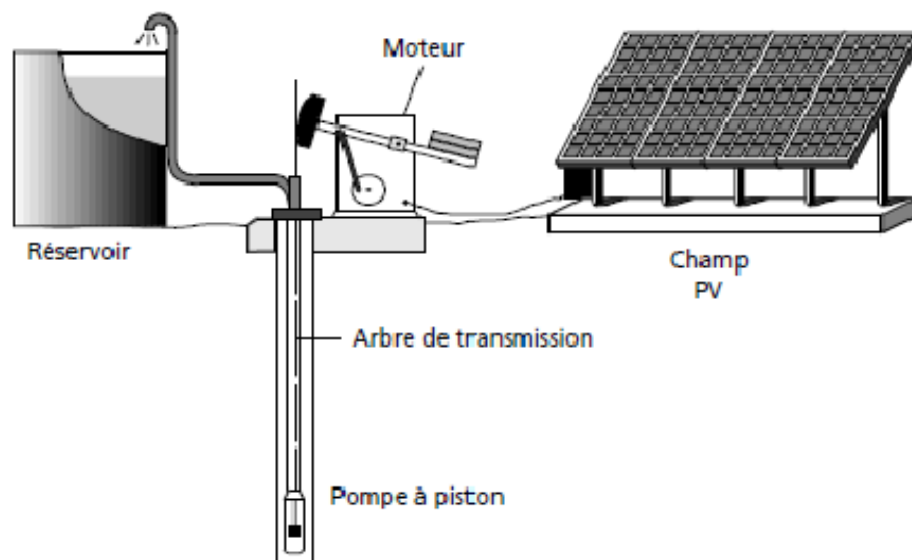


Figure 3.5 : Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau [36].

- **Caractéristiques d'une pompe volumétrique :**

Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la H_{MT} (3 à 5 fois le couple nominale). La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau inférieure à $5(m^3/h)$.

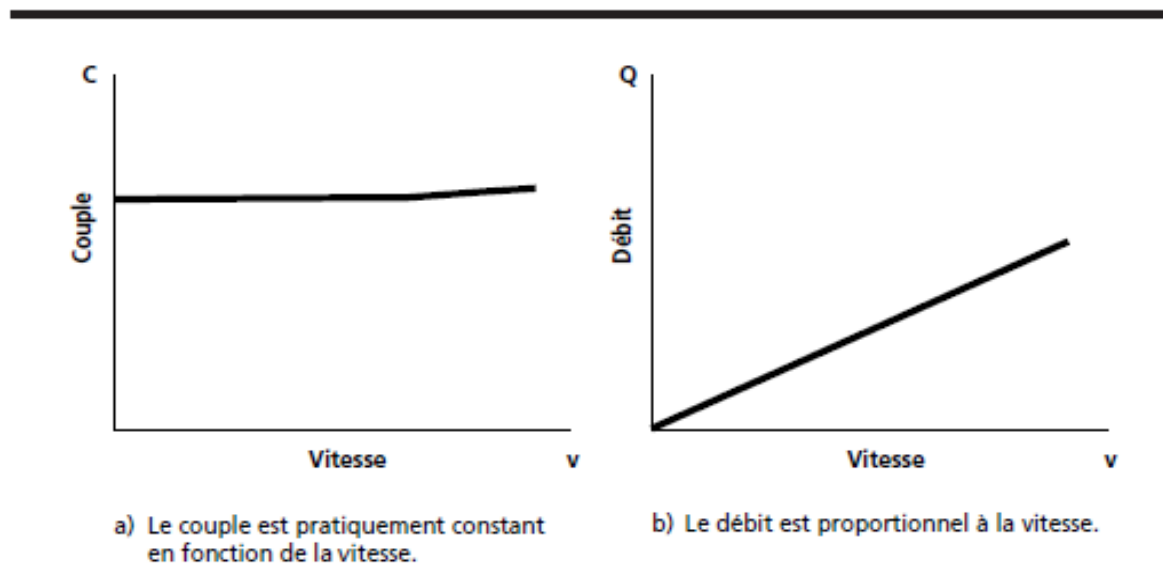


Figure 3.6 : Caractéristique d'une pompe Volumétrique [36].

4.1.2. La pompe centrifuge :

Transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre à l'intérieur de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée.

Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

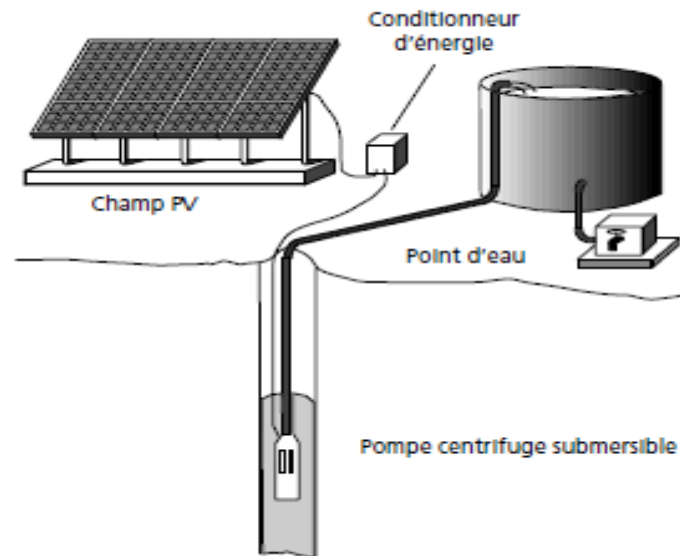


Figure 3.7 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples [36].

- **Caractéristiques d'une pompe centrifuge :**

Les pompes centrifuges sont conçues pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à $Q * HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage.

La pompe tourne par très faible ensoleillement.

Le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante.

Le rendement de la pompe centrifuge est fonction du débit, elle fonctionne de façon plus efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée. Il est donc important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain.

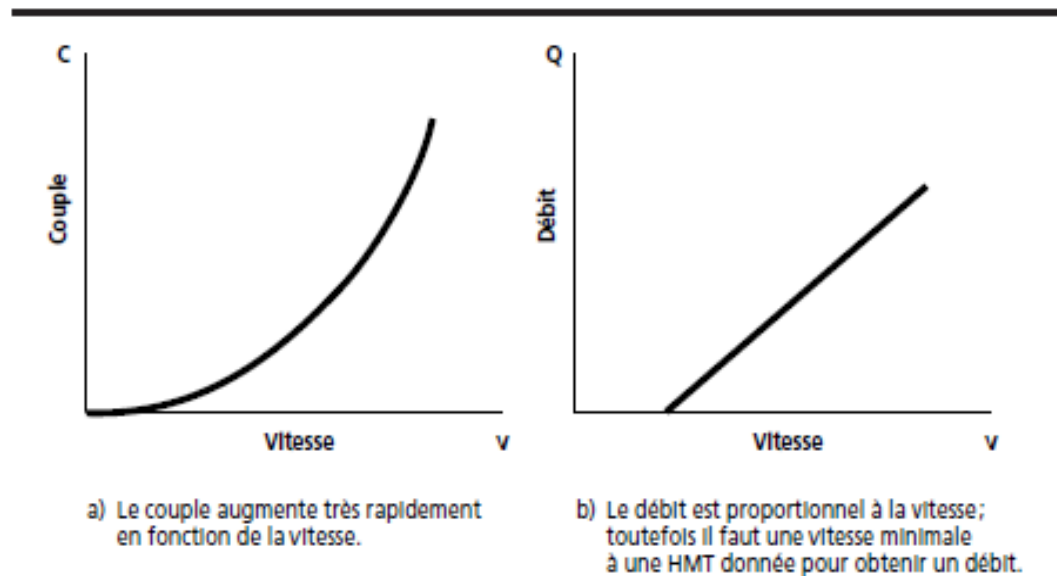


Figure 3.8 : Caractéristiques d'une pompe centrifuge [36].

4.1.3. Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques :

Le choix d'une pompe se portera sur sa capacité à répondre aux conditions variables du site. Le débit d'une pompe volumétrique est moins affecté par la variation de la HMT alors que la pompe centrifuge verra son débit diminuer rapidement à mesure que la HMT augmente. La hauteur de refoulement d'une pompe centrifuge est fonction du carré de la vitesse du moteur. À mesure que la HMT augmente, le rendement de la pompe diminue très rapidement, le moteur devrait tourner beaucoup plus rapidement pour fournir un même débit [36] [38].

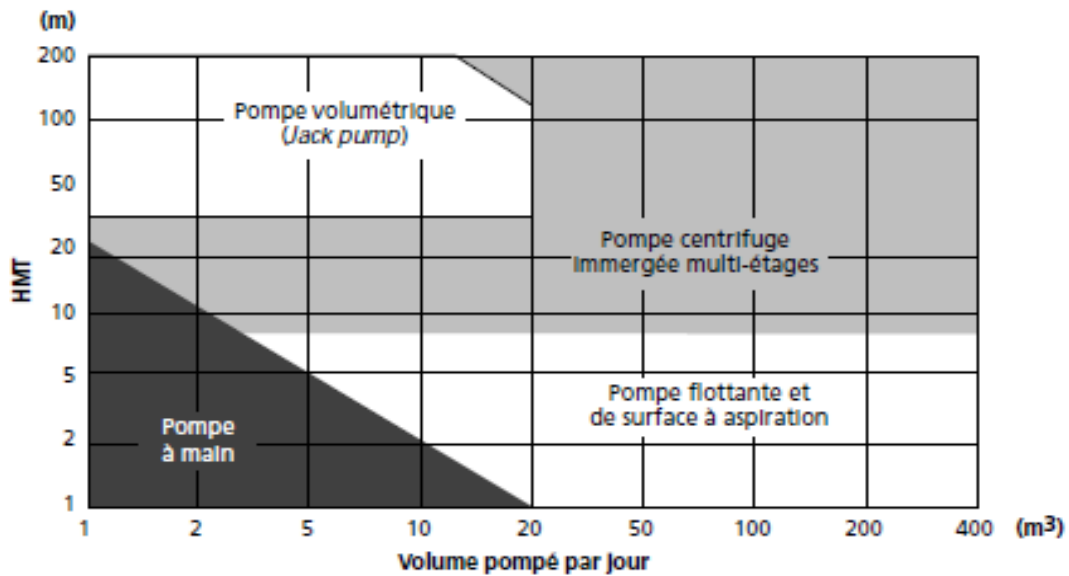


Figure 3.9 : Choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés (Solar pumping de IT Power) [36].

4.2. Les types de moteurs :

Le moteur d'un groupe motopompe est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des machines électriques fonctionnent grâce au magnétisme, il existe deux types de moteurs : à courants continu et alternatif [36] [40].

4.2.1. Moteur à courant continu :

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique.

Les moteurs à balais : Ils sont les plus communs, mais leurs balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. De plus, l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains fabricants offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant cet entretien à toutes les 5 000 heures de fonctionnement.

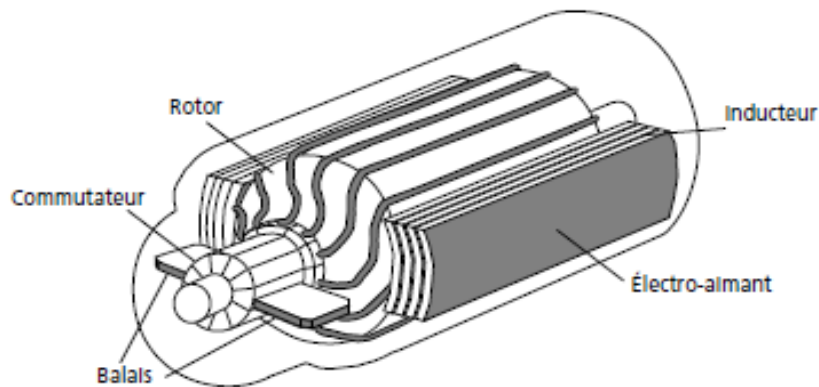


Figure 3.10 : Moteur à courant continu avec balais [36].

Moteur à courant continu, sans balais (Brushless) : Ce type de moteur électrique comporte non seulement les avantages des moteurs à courant continu mais également ceux des moteurs à courant alternatif : fort couple au démarrage et durée de vie élevée (due à l'absence des paliers et des balais) mais leur utilisation reste limitée à des faibles puissances.

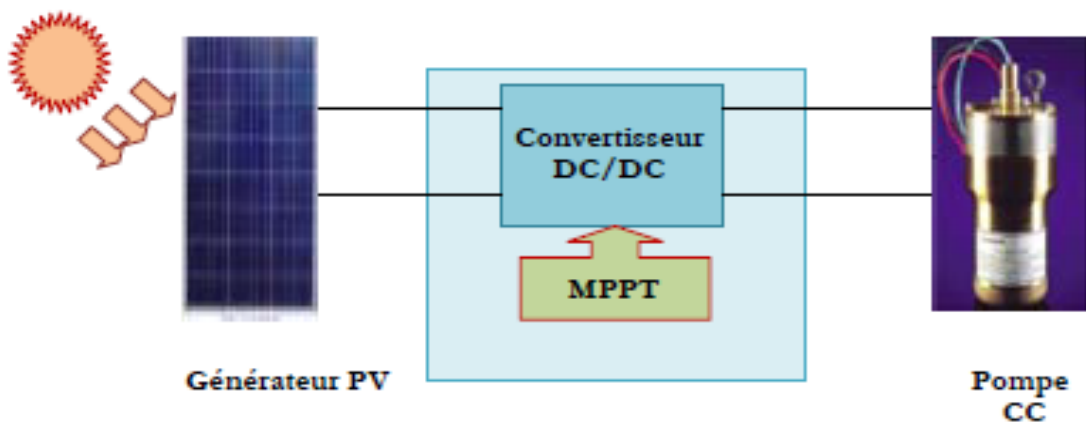


Figure 3.11 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC [16].

4.2.2. Moteur à courant alternatif :

Le moteur alternatif pour le pompage solaire est habituellement de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage). Celui-ci tourne autour de deux paliers lubrifiés par le liquide de refroidissement dont est rempli le moteur. Le stator est noyé dans une résine, qui lui assure une bonne tenue mécanique, une bonne dispersion calorique et une étanchéité parfaite. Ces moteurs sont conçus pour être immergés, l'arrivée d'onduleurs

efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire.

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV voir figure 12 :

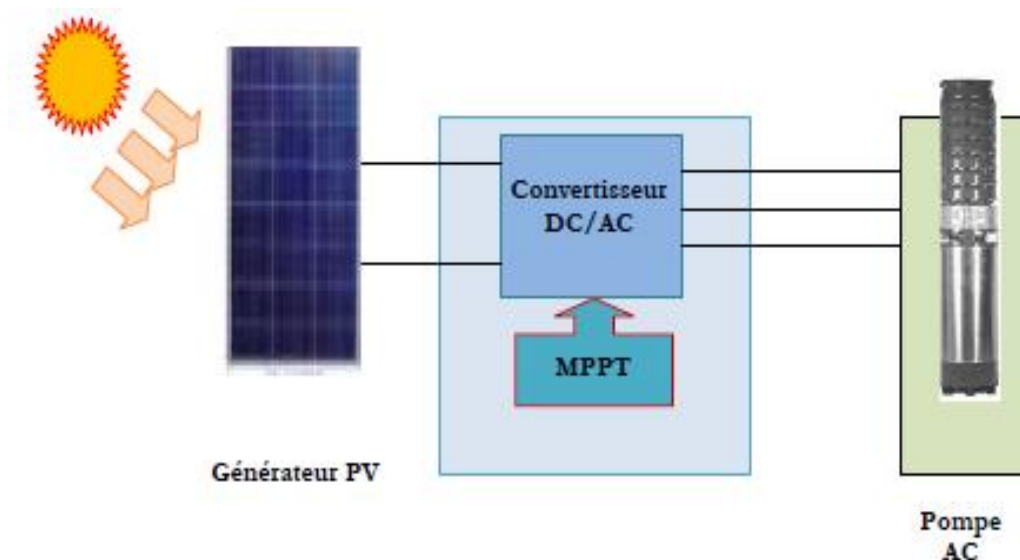


Figure 3.12 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC [16].

4.3. L'électronique de commande et de contrôle :

4.3.1. Le convertisseur DC/DC (hacheur) :

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

4.3.2. Le convertisseur DC/AC (onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par les panneaux solaires en un courant alternatif triphasé pour actionner le groupe moteur pompe.

Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe moteur pompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal [16].

4.4. Le générateur photovoltaïque :

Un panneau solaire est l'assemblage en série et en parallèle des cellules PV. En effet, pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Pour des utilisations plus importantes, les générateurs PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules (quelques centaines).

La courbe de fonctionnement I-V d'une association série-parallèle de modules solaires aura une évolution de fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, mais en modifiant les échelles sur les deux axes.

Les performances d'un générateur PV sont déterminées à partir de ces courbes [16] [36].

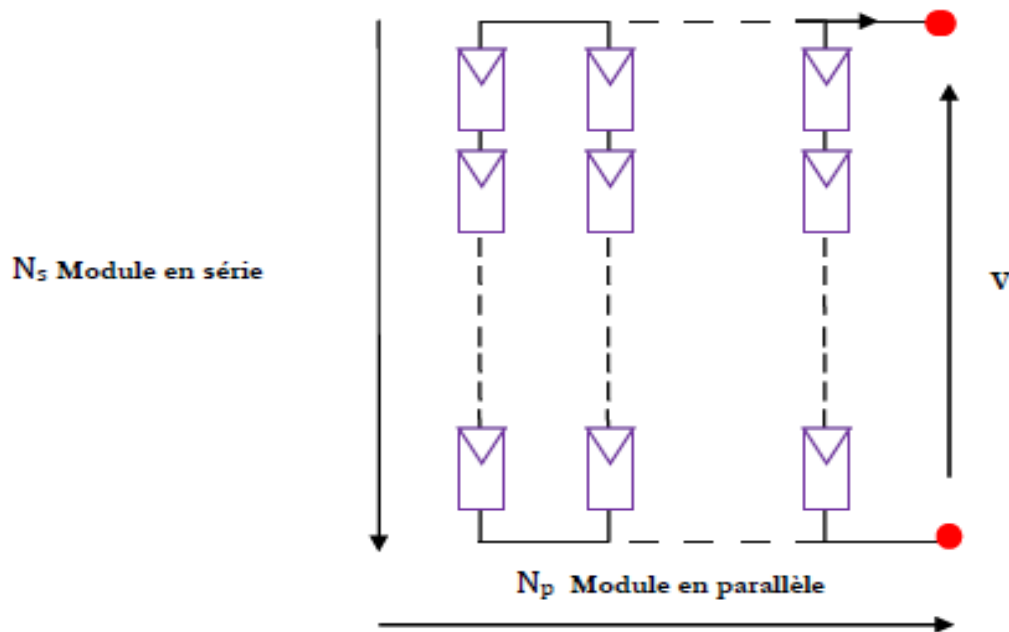


Figure 3.13 : Groupement de N_s module en série et N_p en parallèle [16].

4.5. Définition générale d'une irrigation Goutte à Goutte :

L'irrigation « goutte à goutte » est appelée aussi « irrigation localisée ou micro - irrigation ». On l'appelle irrigation par « infiltration » lorsqu'elle est réalisée au moyen de tuyaux filtrants enterrés. L'irrigation goutte à goutte se développe de plus en plus dans le but de palier à la rareté de l'eau. Elle se caractérise par un apport d'eau localisé, fréquent et continu utilisant des débits réduits à de faibles pressions. Seule la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement humectée. Cela permet une réduction de l'évaporation, une meilleure conservation de la structure du sol et une réduction des mauvaises herbes. Ce système permet aussi d'exploiter des champs à topographie et configuration irrégulières, des sols lourds qui se fissurent en été, ou des sols légers filtrants. La fréquence élevée des arrosages permet une dilution des sels présents dans la solution du sol sous le distributeur et un maintien des sels à la périphérie du bulbe humecté [41].

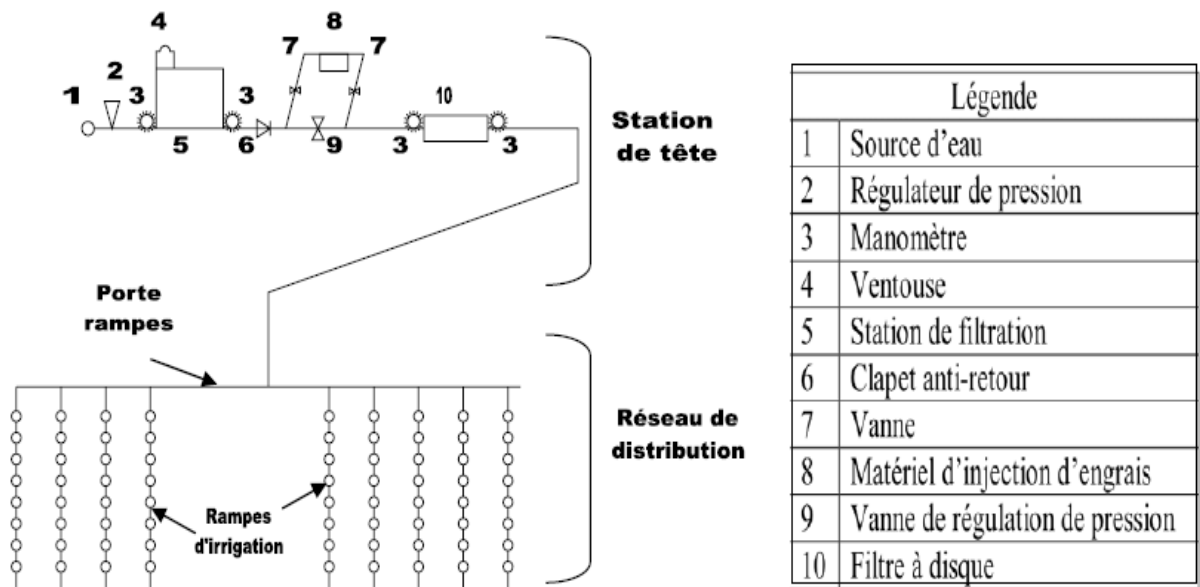


Figure 3.14 : Schéma d'un réseau d'irrigation [41].

Le réseau d'irrigation (fig14) est composé d'une station de tête qui comprend les systèmes de filtration et d'injection ainsi que des accessoires relatifs à la régulation de pression et à la protection du système, et d'un réseau de distribution. Celui-ci est composé de conduites d'amenée et de secteurs d'irrigation.

Le goutte à goutte permet une économie de l'eau (50 à 70 % par rapport au gravitaire et 30% par rapport à l'aspersion) et une utilisation de la ferti-irrigation ou fertigation, technique qui

consiste à amener le fertilisant dilué dans l'eau au pied des plantes pour en éviter le gaspillage et réduire la pollution des nappes phréatiques par les engrais. Par rapport aux autres systèmes d'irrigation, le goutte à goutte permet également une baisse des dépenses en énergie utilisée dans le pompage, une réduction du coût de la main d'œuvre impliquée dans les opérations de l'irrigation et de la fertilisation, et une baisse des quantités d'eau et d'engrais utilisés.

5. Dimensionnement complet de l'installation :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

5.1. Estimation des besoins en eau :

5.1.1. Méthodologie :

Dans le cas d'une irrigation goutte à goutte, l'eau est déversée sur la plante le plus fréquemment possible ou en continu, et quotidiennement. Quant à la détermination de la quantité d'eau à apporter, on doit irriguer de sorte à compenser les pertes par évaporation et à prévenir la salinisation de la rhizosphère (fig15) [38].

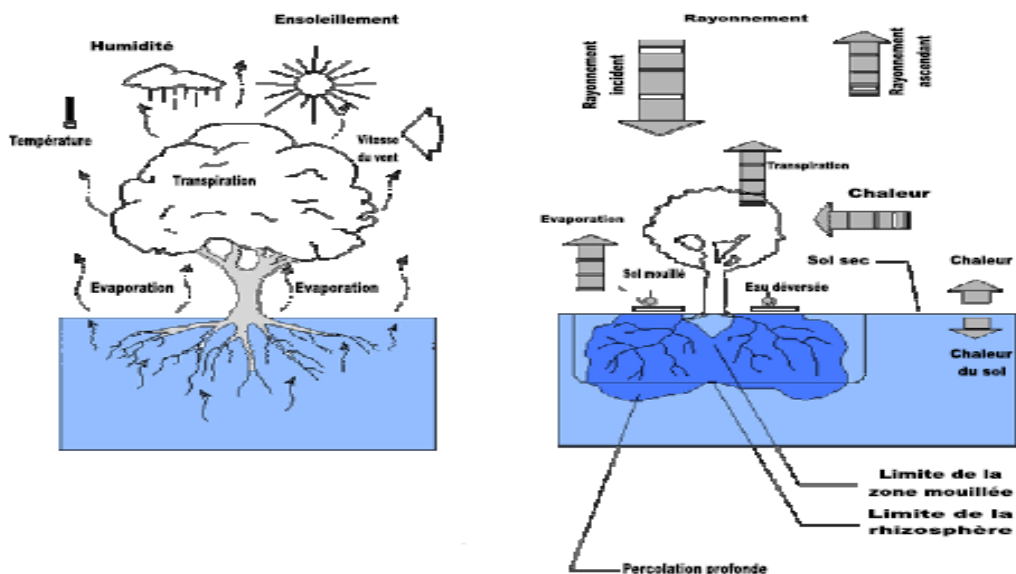


Figure 3.15 : Cycle d'évapotranspiration.

5.1.2. Modes de calcul :

5.1.2.1. L'évapotranspiration :

La plante utilise une quantité d'eau importante qu'elle puise principalement dans le sol et qu'elle rejette dans l'atmosphère par transpiration. Un autre circuit parallèle existe depuis le sol directement dans l'atmosphère, c'est l'évaporation du sol. Les deux circuits réagissent l'un sur l'autre, le phénomène est dit l'évapotranspiration [42].

Les pertes par évapotranspiration dépendent des conditions météorologiques, qui varient au fil du temps. Pour les déterminer, on peut observer les variables météorologiques pertinentes (température, vent, humidité atmosphérique et ensoleillement), puis appliquer l'une des nombreuses équations fonctionnelles ou formules permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle [43].

La formule de base utilisée pour déterminer le besoin en eau est l'équation de Penman(1949) donnant l'évapotranspiration de référence ET_0 .

ET_0 est déterminé par la connaissance des facteurs suivants :

- La radiation globale
- L'albedo de la surface
- L'insolation relative
- Le gradient de la tension moyenne de vapeur d'eau par rapport à la température moyenne de l'air
- La vitesse du vent

Il existe bien d'autres équations plus ou moins simples, car réduisant le nombre de paramètres qui entrent en ligne de compte dans le calcul de l' ET_0 , mais elles ne sont utiles que dans le cas où les données météorologiques feraient défaut.

Une autre méthode, plus simple, consiste à estimer les pertes par évaporation en mesurant directement le taux d'évaporation à l'aide des techniques suivantes :

Un évaporimètre standard : Il s'agit d'un récipient peu profond rempli d'eau, que l'on pose sur le sol à l'intérieur de la zone irriguée. On peut calculer facilement la quantité d'eau qui

s'évapore chaque jour en mesurant le volume d'eau perdu. L'évaporimètre donne une indication de l'effet conjugué des rayonnements solaires, du vent, de la température et de l'humidité sur l'évapotranspiration dans un champ [44].

Un lysimètre : Ce sont de gros récipients contenant de la terre. A l'abri des intempéries, ils sont plantés et arrosés. Leur fond étanche permet de recueillir l'excès d'eau. Il permet donc d'effectuer des observations sur la végétation et les consommations d'eau et de mesures E.T.Maximal [42].

5.1.2.2. Les besoins en eau :

Les besoins en eau des cultures présentent le prélèvement journalier de l'humidité édaphique dans la zone racinaire dû à l'évapotranspiration des cultures en soustrayant les pluies efficaces et éventuellement les réserves hydriques du sol. Vu les conditions climatiques de notre région, il est évident que les pluies efficaces et les réserves hydriques du sol sont négligeables. La première formule peut se simplifier sous la forme suivante :

$$\mathbf{BNC = Kc \times ETP} \quad (3.3)$$

Il est à noter aussi que le coefficient cultural dépend du stade végétatif de la culture et les conditions agro climatiques qui régissent son développement.

5.2. Calcul des énergies quotidiennes requises :

5.2.1. L'énergie hydraulique :

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [16] [36] :

$$\mathbf{Eh = C_h \cdot Q \cdot H_{MT}} \quad (3.4)$$

Avec :

Eh : Energie hydraulique (KWh/j).

C_h : Constante hydraulique (Kg.S.h/m²).

Q : Débit d'eau (m³/jour).

H_{MT} : Hauteur manométrique total (m).

Où :

$$C_h = g \cdot \rho / 3600 \quad (3.5)$$

g : La gravité terrestre (9.81m/s^2)

ρ : Densité de l'eau (1000Kg/m^3)

5.2.2. L'énergie électrique :

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_e = E_h / (\eta_{Mp} \times \eta_{ond}) \quad (3.6)$$

Où :

E_e : Energie électrique exprimé en (KWh/j).

η_{Mp} : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%.

η_{ond} : Le rendement d'onduleur.

5.3. Détermination de l'énergie solaire disponible :

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire électrique. Les méthodes du calcul ont été expliquées dans le premier chapitre.

5.4. Dimensionnement de la pompe :

Le choix de la pompe est basé sur les deux facteurs suivants :

- La hauteur manométrique totale Hmt.
- Le débit horaire Q_h .

$$Q_h = \frac{Q[\text{m}^3/\text{jour}]}{h} \quad (3.7)$$

h : est le nombre heures d'ensoleillement maximal à [1000w/m^2]

La courbe qui caractérise le fonctionnement d'une motopompe donnée en fonction de la variation de l'ensoleillement peut se rapprocher de la courbe ci-dessous (fig16), l'axe des

ordonnées est gradué à droite en W et à gauche en %. L'amplitude du débit de la motopompe est indiquée à droite.

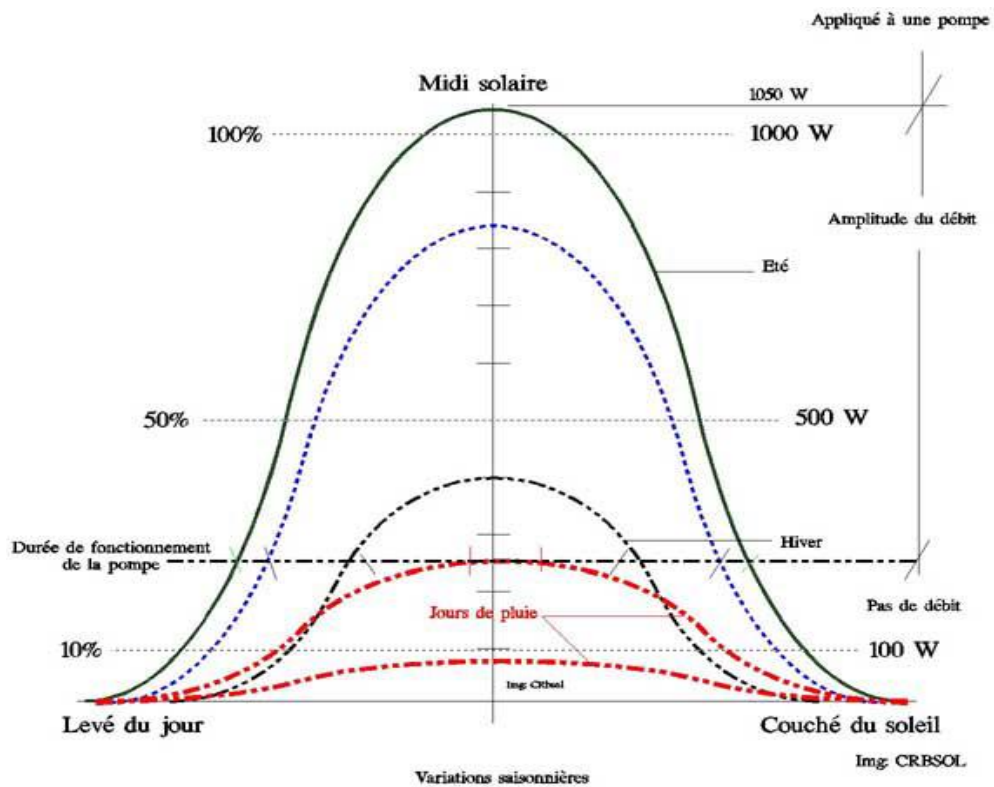


Figure 3.16 : Variation journalière de l'ensoleillement [44].

La motopompe commence à débiter à partir d'une certaine puissance fournie par les modules solaires (ici sur le graphe environ 250 Watts). Le débit de la pompe quasiment nul à cette puissance, augmentera proportionnellement avec l'ensoleillement pour atteindre le maximum à midi solaire. Remarquer l'influence des saisons ou de la météo. Le démarrage du fonctionnement de la motopompe est fonction du type de celle-ci, et de la profondeur de pompage.

5.5. Taille du générateur photovoltaïque :

Deux méthodes sont utilisées pour le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque : une méthode analytique et une méthode graphique. Ces méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée.

5.5.1. Méthode analytique :

Une fois le volume journalier $Q(m^3/jour)$, la hauteur manométrique totale H_{MT} et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur connus, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque P_c est calculée par l'expression suivante [45] :

$$P_c = \eta_g \cdot A \cdot G \quad (3.8)$$

La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM, (éclairage de $(1000w/m^2)$ et la température $25^\circ C$).

Où :

P_c : La puissance de sortie du générateur (w) sous CSM (puissance crête).

η_g : Le rendement du générateur à la température de référence ($25^\circ C$).

A : La surface active du générateur (m^2).

G : L'éclairage dans les conditions CSM.

L'énergie électrique journalière est donnée par l'équation :

$$E_e = \eta_{pv} \cdot A \cdot G_d (\beta) \quad (3.9)$$

Où :

η_{pv} : Le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

G_d : L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β ($KWh/m^2/j$).

Le rendement η_{pv} est calculé par la formule suivante :

$$\eta_{pv} = F_m [1 - \gamma(T - T_r)] \eta_g \quad (3.10)$$

Où :

F_m : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximale [46].

γ : Coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 $/^\circ C$ pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

En substituant les équations précédentes dans la première, nous obtenons la puissance crête du générateur :

$$Pc = \frac{G}{Fm[1-\gamma(T-Tr)]Gd(\beta)} \cdot \frac{Eh}{\eta Mpx\eta Ond} \quad (3.11)$$

5.5.2. Méthode graphique :

Cette méthode graphique a pour but de partir de l'étude d'un cas particulier de dimensionnement afin de dégager une méthode générale. Cette méthode s'appuie sur des abaques qui accompagnent généralement les motopompes. Elle à pour pertinence le fait qu'elle est l'une des méthodes recommandées par les constructeurs [44].

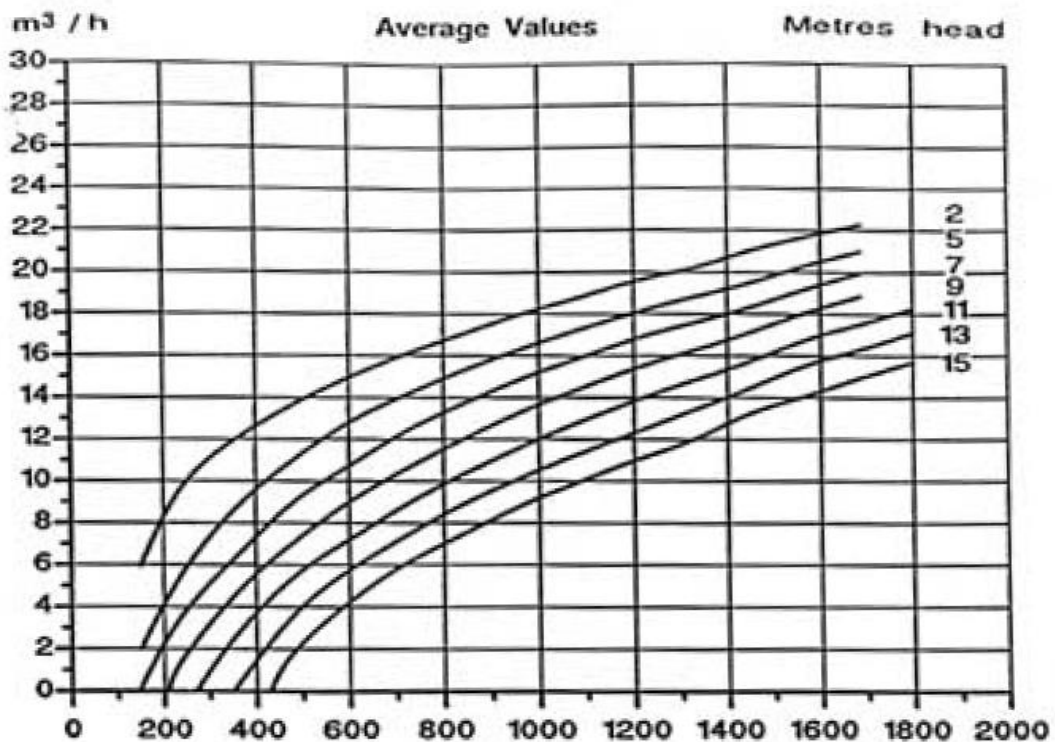


Figure 3.17 : Caractéristique de fonctionnement d'une pompe centrifuge [44].

L'abaque de la figure (3.17) est celui d'une motopompe centrifuge donnée. Il indique les débits obtenus pour chaque puissance fournie par les modules solaires photovoltaïques. On peut constater par exemple qu'avec une puissance de sortie de 175 watts environ, cette motopompe débite 6m^3 à l'heure à 2 mètres de HMT (hauteur manométrique totale), 2m^3 à 5 mètres, et 0m^3 pour les autres hauteurs, ect...

On peut remarquer pour ce type de motopompe, la moindre erreur sur le dimensionnement peut avoir de graves conséquences. A l'évidence, toute motopompe a sa fourchette de hauteur manométrique qu'il faudra étudier avant de choisir.

Pour les motopompes solaires il existe d'autre abaque, cette dernière intègre l'ensoleillement moyen, le Débit, la Puissance du champ PV et la HMT, d'une motopompe. Elle permet aussi de déterminer la puissance des modules solaires photovoltaïques à mettre en place, en connaissant le débit désiré, le lieu de l'installation, la profondeur du forage, et la hauteur de refoulement (HMT) de la motopompe solaire.

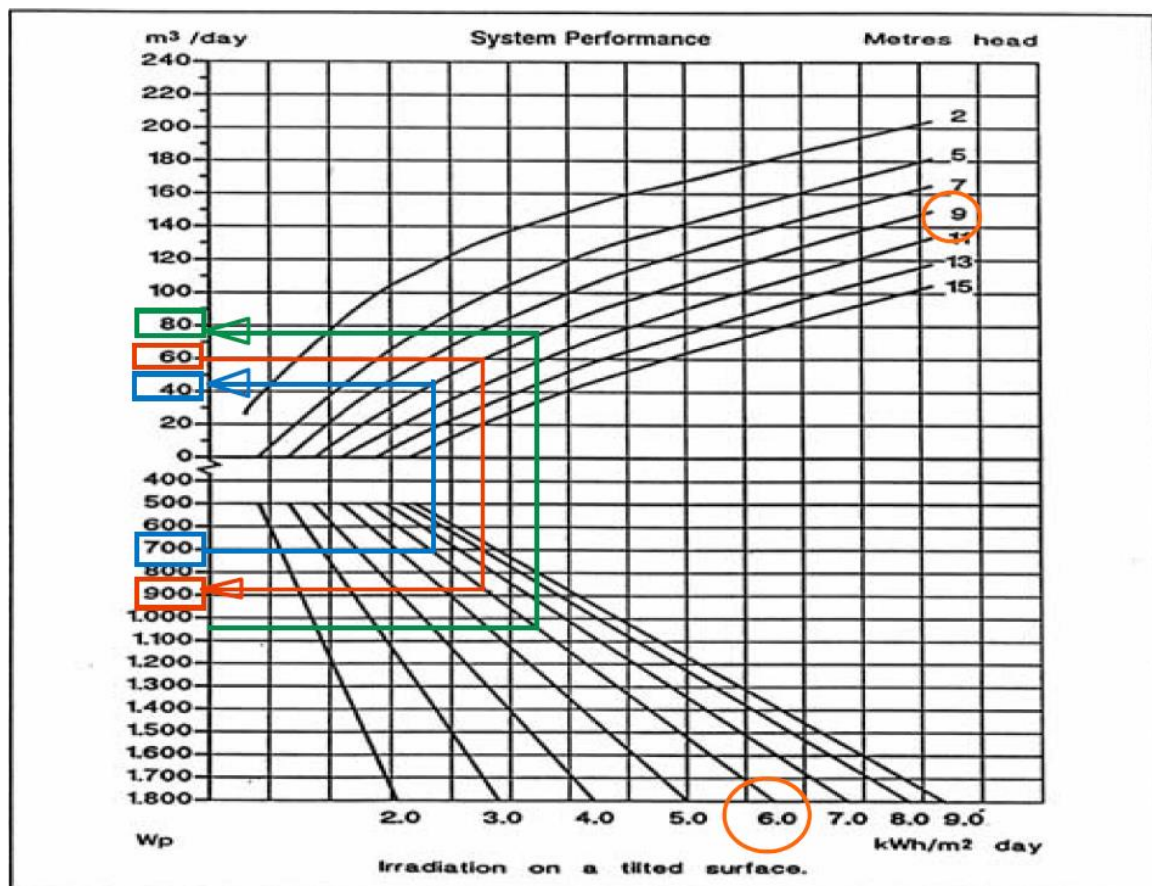


Figure 3.18 : Courbe caractéristiques d'une pompe centrifuge et dimensionnement PV

[44].

Son utilisation est simple. Par exemple, connaissant le débit ($60 \text{ m}^3/\text{jour}$), à une hauteur de 9m, tirons un trait horizontal à parti de 60m^3 .

Ce trait coupe les courbes de débit, notamment celle correspondant à 9 mètres. Plaçons le point de croisement. De ce point, tirons une ligne verticale, qui va croiser les courbes d'ensoleillement que nous repèrerons. Enfin, de ce dernier point, traçons une nouvelle droite en direction de l'échelle "Wp" Qui signifie Watts crêtes, et lisons une valeur. Dans notre cas, en supposant que l'ensoleillement du lieu de l'installation soit de $6 \text{ KWh/m}^2/\text{jour}$, nous trouvons environ 900! Ce qui signifie qu'il faut installer 900 Wc au minimum de modules solaires photovoltaïques pour obtenir le débit désiré.

5.6. La procédure du dimensionnement :

Pour le dimensionnement de la station il faudrait un minimum de données qui sont :

- La situation géographique pour déterminer l'irradiation solaire globale.
- Déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal
- La hauteur manométrique totale

Dans le prochain chapitre, on procédera comme suit :

1. Définir l'irradiation globale journalière mensuelle en ($\text{wh/m}^2/\text{j}$) par rapport à la latitude de la zone de travail.
2. Choisir une pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale.
3. Choisir l'onduleur adapté à la pompe (tension et puissance).
4. Déterminer la puissance crête PC nécessaire au fonctionnement de la pompe par la méthode analytique ou graphique.
5. Choisir le type de panneau solaire (définir leur puissance nominale P_n)
6. Déterminer le nombre de panneaux par la relation P_c/P_n
7. Vérifier la tension nominale pour le fonctionnement de l'onduleur (selon les modèles).
8. Déterminer le nombre de module série / parallèle (la forme de connexion).

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ».

Nous avons aussi donnée les définitions importantes et nécessaires pour la compréhension de l'étude pratique présentée au chapitre suivant entre autres les techniques d'irrigation et les différentes pompes utilisées.

Nous avons terminé par la méthodologie de dimensionnement.

CHAPITRE 4 : ÉTUDE DE CAS

1. Introduction :

Dans la partie précédente de ce travail, nous avons bien détaillé l'étude et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Il est alors intéressant d'appliquer les techniques étudiées sur un site réel et une culture bien déterminée. Pour cette étude pratique, nous avons choisi la région de Ghardaïa (là où nous avons fait notre stage à l'URAER) et le palmier dattier comme culture.

Ghardaïa est caractérisée par un climat saharien, une énergie d'ensoleillement annuelle de 5.8 kWh/m²/j dans la région de MENA et des ressources importantes d'eau souterraine [47]. La moyenne annuelle globale d'irradiation solaire mesurée pour un plan horizontal excède les 6000 Wh /m² et la durée d'ensoleillement dépasse les 3000 heures/an [48].

Dans ce chapitre, nous allons étudier le dimensionnement d'un système de pompage solaire photovoltaïque fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil ». Le stockage de l'eau est réalisé par le biais d'un réservoir afin d'irriguer une surface d'un hectare de palmier dattier.

2. Présentation de la zone d'étude :

2.1. Situation géographique de Ghardaïa :

2.1.1. La Wilaya de Ghardaïa :

La Wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie Nord du Sahara Algérien. Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984 et elle est limitée :

- Au nord par la Wilaya de Laghouat.
- Au nord Est par la Wilaya de Djelfa.
- A l'est par la Wilaya de Ouargla.
- Au sud par la Wilaya de Tamanrasset.
- Au sud-ouest par la Wilaya d'Adrar.
- A l'ouest par la Wilaya d'El-Bayadh.

Elle compte 13 communes réparties sur 3 daïras et couvre une superficie de 86.560 km² comme le montre le (tableau 4.1) : (Atlas de Ghardaïa, 2004) [49].

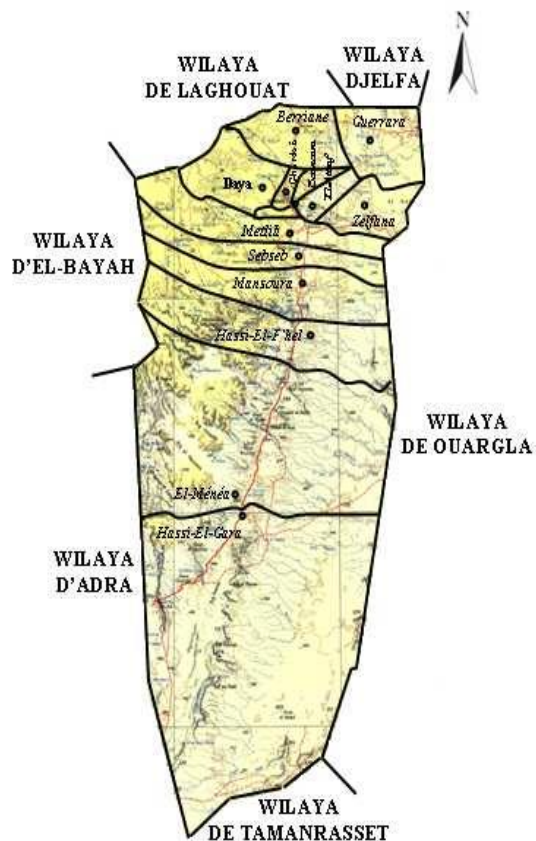


Tableau 4.1 : Superficies des communes de la wilaya

Communes	Superficies (km ²)
Ghardaïa	300
El-Ménéa	27000
Daya	2175
Berriane	2250
Metlili	7300
Guerrara	2900
El-Atteuf	750
Zalfana	2220
Sebseb	5640
Bounoura	810
Hassi El-F'hel	6715
Hassi El-Gara	22000
Mansoura	6500
Total	86560

Figure 4.1 : Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa [49].

2.1.2. La commune de Ghardaïa :

Le territoire de la commune de Ghardaïa est situé au nord de la wilaya dont elle est le chef-lieu, située à 600 Km au sud d’Alger. Elle est la capitale de la vallée du Mزاب.

Ghardaïa fait partie du patrimoine mondial et elle est considérée comme site touristique d’importance majeure en Algérie [50] [51].

2.1.3. L’URAER : (Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables)

Créer en Novembre 2002, l’URAER rattachée au centre de développement des énergies renouvelables (CDER) est située à 1 kilomètre de l’aéroport de Ghardaïa et à 600 km d’Alger. Sa mission principale est la recherche scientifique appliquée dans les énergies renouvelables.

L'URAER vise à développer, diffuser et valoriser de nouvelles pistes de recherche appliquée en vue d'offrir un lieu de concertation et de coordination pour les activités de recherche liée aux énergies renouvelables.

L'URAER assure des prestations de service, notamment l'étude et la réalisation des systèmes solaires :

- Etude et réalisation des systèmes photovoltaïques : éclairage photovoltaïque, pompage solaire...
- Alimentation en énergie solaire des maisons autonomes : électricité, eau chaude sanitaire, climatisation...
- Serres agricoles intelligentes
- Audits énergétiques
- Données météorologiques : éclairement solaire, température, humidité, vitesse et direction du vent...

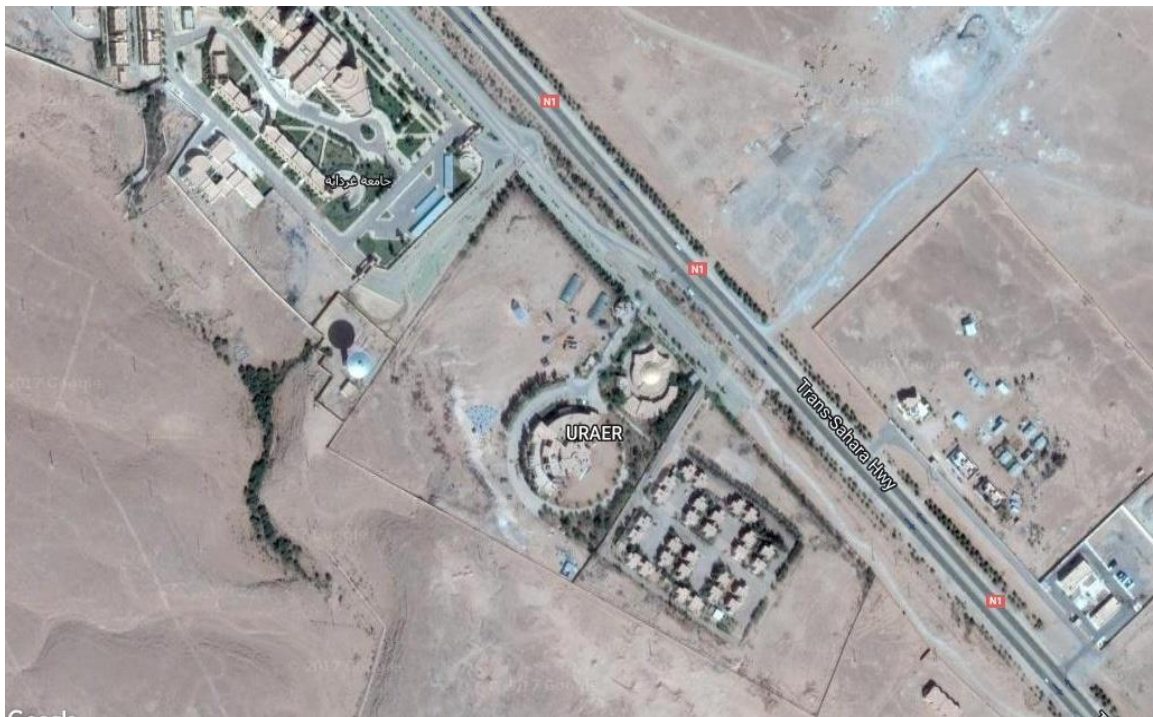


Figure 4.2 : Situation géographique du champ (Google Earth).

2.2. Situation agricole de Ghardaïa :

La superficie totale de la wilaya s'étend sur 8.466.012 hectares et repartit dans le tableau suivant :

Tableau 4.2: occupation des sols de la wilaya de Ghardaïa

Désignation		Superficies (ha)
Terres utilisées par L'agriculture	La superficie agricole utile (S.A.U)	32.745
	Les pacages et parcours	1.337.994
	Terre improductives des exploitations agricoles	172
Superficie total terres utilisées par l'agriculture (S.A.T)		1.370.911
Autres terres	Terrains improductifs non affectés à l'agriculture	7.095.101
Superficie total de la wilaya		8.466.012

D.S.A.Ghardaïa (2013)

En prenant en compte le problème de l'eau et les faibles précipitations dans la région de Ghardaïa, la S.A.U exploitée se limite aux seules superficies bénéficiant d'une ressource hydrique (forages, puits). Le reste est constitué de pacages et parcours 1.337.994 et de terres improductives des exploitations agricoles 172 ha.

La S.A.U réellement exploitée ne représente qu'une infime partie de la superficie totale de la Wilaya soit 0.31%. Pour une population de 396.452 habitants, la S.A.U par habitant au niveau de la Wilaya est de 0.08 ha [52].

2.3. Caractéristiques des sols de Ghardaïa :

Ghardaïa est caractérisée par des sols de faible taux de matière organique, un pH alcalin, une faible activité biologique et une bonne aération. La salinité des sols varie d'une parcelle à une autre [53].

La forme géologique général de la région se compose de:

Le Hamada : Dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres. Le paysage est caractérisé par une vaste étendue pierreuse où affleure une roche nue de couleur brune et noirâtre [52].

Les ergs (massifs de dunes).

Les Regs (plaines caillouteuses).

La majorité des sols sont pierreux, nous pouvons distinguer les différents types du sol de cette région dans la figure suivante [54] :

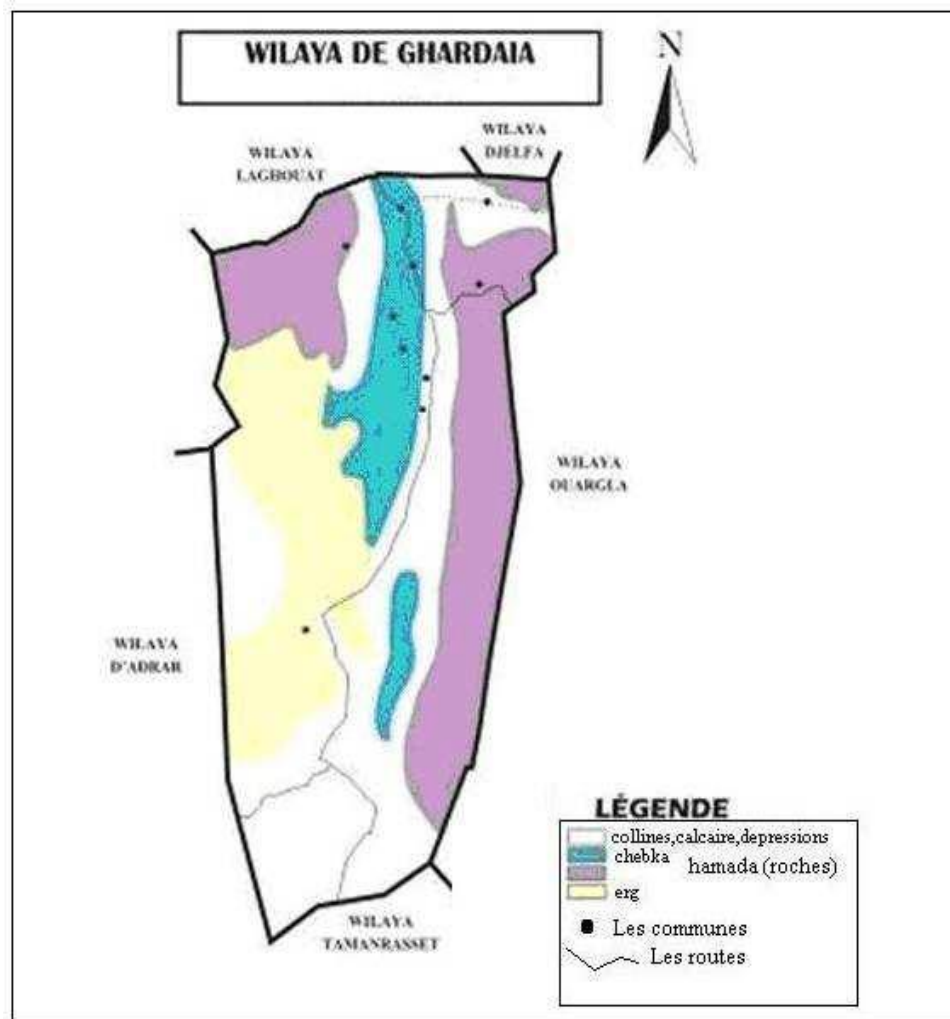


Figure 4.3 : La structure géologique de Ghardaïa (Atlas de Ghardaïa, 2004)

2.4. Ressources en eaux souterraines de Ghardaïa :

Dans la ville de Ghardaïa, et comme toutes les zones sahariennes, l'évaporation est plus importante que le niveau de précipitations.

La principale source d'eau utilisable dans ces régions, c'est l'eau fossile située dans la couche géologique du continental intercalaire, qui s'appelle la nappe albienne. Cette nappe contient une réserve importante des eaux non renouvelables situées en dessous du grand Erg Oriental, (Atlas de Ghardaïa, 2004, D.H.W., 2004) [54].

Au Sahara septentrional, le bassin sédimentaire constitue un vaste bassin Hydrogéologique d'une superficie de 780 000 Km², avec un maximum d'épaisseur de 4000 à 5000 m [49] [55] [56]. Ce grand bassin comporte deux vastes aquifères profonds et superposés, relativement indépendants en Algérie, qui sont :

2.4.1. La nappe du Complexe Terminal :

Contenue dans les divers horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire. Elle s'étend en Algérie sur un vaste territoire allant de la dorsale du M'Zab à l'Ouest jusqu'à la hamada du Tihert au Sud.

Elle comprend :

- ✓ La nappe phréatique ;
 - ✓ La nappe du mio-pliocène;
 - ✓ La nappe du sénono-éocène;
 - ✓ La nappe du turonien ;
- La nappe superficielle ou alluviale qui est une nappe d'Oued. Elle est alimentée par les crues de l'Oued M'Zab. La profondeur de cette nappe est variable selon la saison, la profondeur oscille entre 5 et 30 m et augmente sensiblement vers le Sud –Est [57].
- La nappe du Mio-Pliocène et Eocène : il s'agit d'une nappe de Mio-Pliocene sableux de 125 m d'épaisseur en plus d'une nappe d'Eocène à calcaire blanc fin et de 100 m d'épaisseur.
- La nappe du Sénonien est liée aux deux précédentes nappes et qui peut être exploitée à environ 430 m de profondeur.
- La nappe de Turonien carbonate, d'une épaisseur de 74m, de 500 m de profondeur.

2.4.2. La nappe du continental intercalaire : plus souvent dite nappe albiennaise, elle constitue la formation la plus étendue qui se trouve à environ 500 à 900m de profondeur [58].

2.5. Recensement des forages de Ghardaïa :

La wilaya compte actuellement plus de 288 forages, qui se présentent comme suit :

- 75 pour l'AEP
- 108 pour l'IRR
- 5 pour l'AEI
- 24 à caractère mixte AEP et IRR
- 76 forages non exploités pour des raisons divers (équipements, non électrifiés...).

Le débit extrait dans la wilaya de Ghardaïa varie de 4 à 80 l/s, le volume annuel est estimé à 179,3 Hm³ [49].

N°	Communes	Nombre de Forage	Forage exploité	Débit d'exploitation	Débit moyen
1	Daya	11	4	140,5	35,0
2	Ghardaïa	28	19	513,0	27,0
3	Bounoura	13	10	270,0	27,0
4	Atteuf	16	11	331,0	30,0
5	Berriane	15	13	277,0	21,0
6	Guerrara	22	17	940,0	55
7	Metlili	21	19	600,5	32
8	Zelfana	13	13	902,0	75
9	Mansourah	10	8	228,5	28
10	Hassi F'hel	19	19	1059,0	60
11	Sebseb	8	7	282,0	40
12	El Goléa	112	72	2265,0	31
Totaux		288	212	7808,5	/

Tableau 4.3 : Exploitation de la nappe du CI à travers la wilaya Ghardaïa (ANRH).

2.6. Climatologie de Ghardaïa :

La région de Ghardaïa se caractérise par un climat saharien, qui se distingue par une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit, d'été et d'hiver avec une très faible pluviométrie et une forte évaporation qui font disparaître la couverture végétale, accroissent l'importance du moindre souffle de vent et lui permettent des actions mécaniques toujours notables.

Les facteurs climatiques qui vont être étudiés sont les précipitations, la température, le vent, l'humidité relative de l'air, l'insolation et l'évapotranspiration durant les périodes d'années (2003-2013) [52] [60]. O.N.M.Ghardaïa (2013)

2.6.1. La pluviométrie :

Les précipitations sont très faibles et irrégulières. Généralement, elles sont torrentielles et durent peu de temps, sauf cas exceptionnel. La hauteur annuelle des précipitations est de **91.25 mm** avec un maximum de **22.46 mm** au mois de septembre et un minimum de **1.79 mm** au mois de février (tableaux 4.4), La pluviométrie de la Wilaya est très faible. Selon les données statistiques, sur une période d'observation de **10 ans**, on constate que la pluviométrie est très faible. La moyenne annuelle est de **80.83 mm**.

Tableau 4.4 : Précipitation mensuelles de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)

P	Mois												
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Cum
2004-2013	11,76	1,79	3,55	8,75	1,89	3,23	3,20	4,56	22,46	9,71	5,84	4,11	80,83

P : pluviométrie (mm)

O.N.M Ghardaïa (2013)

2.6.2. La température :

Elle est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. La période chaude commence au mois de Mai et dure jusqu'au mois de Septembre. L'analyse d'une série rétrospective d'observations statistiques enregistrée au niveau de la Wilaya de Ghardaïa, sur une période d'observations de **10 ans**, a fait ressortir que la température moyenne enregistrée a été de **27,47 °C**.

Tableau 4.5 : Moyenne des températures (°C.) mensuelles de la région de Ghardaïa pour les dix années (2003-2012).

°C	Mois											
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
T _{max}	17,39	18,88	24,47	28,58	33,16	38,37	42,07	41,09	35,85	28,47	22,93	17,95
T _{min}	6,13	7,40	10,96	14,88	18,66	24,34	25,29	27,49	22,65	17,96	11,45	7,17
T _{moy}	11,82	13,40	17,68	21,66	26,05	31,75	34,97	34,34	29,53	23,54	17,42	12,63

O.N.M Ghardaïa(2013)

- **T_{min}**: moyennes de températures minimales mensuelles exprimées en (°C).
- **T_{max}**: moyennes de températures maximales mensuelles exprimées en (°C).
- **T_{moy}**: est la moyenne des températures mensuelles exprimées en (°C).
- **T** : Température annuel exprimées en (°C).

2.6.3. Le vent :

Le vent est un phénomène continuels au désert ou il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce aux particules sableuse qu'il transporte. Les valeurs du vent enregistrées dans la région de Ghardaïa de l'année 2013 sont mentionnées dans le tableau (4.6).

Tableau 4.6 : Moyenne mensuelles des vitesses de vent de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
V	3,9	3,8	3,1	4,1	3,7	3,2	2,4	2,2	2,4	2,4	2,6	2,2

O.N.M. Ghardaïa (2013)

V : Vitesse (m/S)

2.6.4. L'humidité relative de l'air :

Pendant l'été, elle chute jusqu'à 21,6% au mois de juillet, alors qu'en hiver elle s'élève et atteint une moyenne maximale de 55,8% au mois de janvier (tableaux 4.7)

Tableau 4.7: Moyenne mensuelles de l'humidité de l'air de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Hr (%)	55,8	45,2	38,4	33,9	29,2	25	21,6	25,8	37,3	44,2	47,9	55,6

O.N.M Ghardaïa,(2013)

Hr : humidité relative (%)

2.6.5. L'insolation :

La durée moyenne annuelle de l'insolation est de 282.6 heures/mois, avec un minimum de 234.5 heures/mois en décembre et un maximum de 337.3 heures/mois en juillet.

Tableau 4.8: Moyenne mensuelles de l'insolation de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Ins (H)	248,6	248,9	277,9	297,5	331,2	336,2	337,3	323,9	270,3	254,5	250,4	234,5

O.N.M.Ghardaïa, (2013)

2.6.6. L'évapotranspiration :

2.6.6.1. L'évapotranspiration mesurée :

Les fortes températures et les vents violents accourent la tension de l'évaporation, dont le maximum mensuel est de **398,4 au** mois Juillet et le minimum est de **91,5** au mois Janvier (tableau 4.9).

Tableau 4.9 : Evaporations mensuelles de l'humidité de l'aire de la région de Ghardaïa pour les dix dernières années (2003-2012)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Evap	91,5	115,1	181,1	238,1	288,8	341,4	398,4	351,2	246	169,9	112,4	157,4

O.N.M Ghardaïa (2013)

Evap : Evaporation en mm

2.6.6.2. L'évapotranspiration sous environnement CRPWAT 8.0 :

2.6.6.2.1. CROPWAT 8.0 :

En utilisant le logiciel de pilotage des irrigations développé par la FAO en 1992 nommé CROPWAT 8.0 pour Windows (version 8.0 2009), ce programme informatique permet de calculer les besoins en eau des cultures et les besoins en irrigation à partir des données climatiques et culturelles.

L'évapotranspiration de référence est calculée, en utilisant la formule de la méthode de Penman-Monteith modifiée par la FAO avec le logiciel CROPWAT 8.0 réalisé par le service des eaux de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

2.6.6.2.2. Evaluation numérique :

Les résultats de calculs, pour notre région d'étude, sont obtenus sur la base des données climatiques de la station de Ghardaïa (O.N.M.Ghardaïa(2013) choisis comme référence pour des raisons de simplification des calculs.

Avec :

- Une Altitude de 464m
- Une latitude de 32°23' N
- Une longitude de 3°46' E

Les valeurs calculées de l'ETP sont représentées dans le tableau suivant :

Mois	Temp Min	Temp Max	Humidité	Vent	Insolation	Ray.	ETo
/	°C	°C	%	m/s	heures	MJ/m ² /jour	mm/jour
Jan	6,1	17,4	56	3,9	8,1	13	2,92
Fév	7,4	18,9	45	3,8	8,9	16,2	3,84
Mars	10,9	24,4	38	3,1	9	19,4	5
Avr	14,9	28,6	34	4,1	9,9	23,2	7,17
Mai	18,6	33,1	29	3,7	10,7	25,7	8,4
Juin	24,3	38,3	25	3,2	11,2	26,8	9,28
Juillet	27,3	42,1	21	2,4	10,9	26	8,85
Août	27,5	41,1	26	2,2	10,4	24,2	8,09
Sep	22,6	35,8	37	2,4	9	20,1	6,62
Oct	17,9	28,4	44	2,4	8,2	16,2	4,72
Nov	11,4	22,9	48	2,6	8,3	13,6	3,49
Déc	7,1	17,9	55	2,2	7,5	11,6	2,29
Moyenne	16,3	29,1	38	3	9,3	19,7	5,89

Tableau 4.10: Les valeurs de l'Evapotranspiration de référence ET₀ (CROPWAT 8.0)

Les valeurs calculées et mesurées de l'ETP sont représentées dans l'Histogramme de la figure (4) suivant :

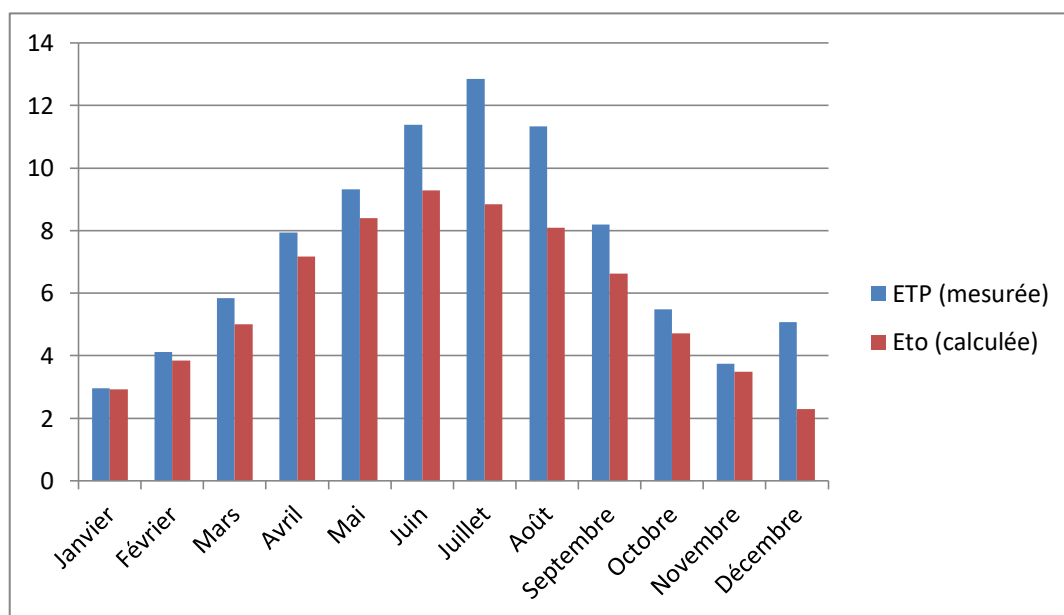


Figure 4.4 : Comparaison entre l'ETP mesurée et l'ETP calculée.

3. DIMENSIONNEMENT :

3.1. Estimation des besoins en eaux :

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question).

Cependant, la pratique et l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins.

3.1.1. Evaluation expérimental :

Besoins en eau du palmier dattier : Le palmier dattier a une vie intense au rythme des saisons. Il doit fabriquer des tissus nouveaux, en particulier des palmes, 24 par an en moyenne, les inflorescences, 10 à 18 par an et donne jusqu'à 200 Kg de dattes dosant de 60 à 90 % de sucre. En Oued Righ situé dans le sud-est algérien, les doses d'irrigation utilisées sont de l'ordre de 28 000 m³/ha/an (Q= 0,90 l/sec/ha) et dans les Zibans situé principalement à Biskra, les doses d'irrigation sont de l'ordre de 15 000 m³/ha/an (Q=0,50 l/sec/ha) [61].

3.1.2. Evaluation Théorique :

Nous allons calculer les besoins mensuels journaliers en eau d'un hectare de palmier adulte à Ghardaïa, par l'équation suivante établie à partir de [62-63].

$$V_j = [(Kc.ETP - Pu - X.RFU). S.C.10]/(e.Nj) \quad [64] \quad (4.1)$$

V_j : Volume journalier mensuel d'eau d'irrigation (m³/j).

L'ETP : L'évapotranspiration de référence en (mm/mois).

C : Le coefficient de couvrage dépend du système d'irrigation dans le cas de goutte à goutte égale 0.5 [65].

Le coefficient culturel (Kc) est une valeur moyenne d'un palmier dattier adulte sans tenir compte de la variété du palmier. Il devrait être inférieur à 1 mais en réalité il varie entre 0,7 et 1,3 environ. Kc est défini expérimentalement [66]. Pour notre cas Kc varie entre (0,9 - 1) [67].

En général, le rationnement ralentit la croissance. Dans les mois qui précèdent la récolte, il accélère la maturation mais diminue la taille des dattes.

Pluie utile (Pu) (mm) : pris égale (0) à cause du déficit des pluies dans la région.

RFU : Dose pratique en (mm).

X : Coefficient entre (0 et 1).

X.RFU : Pris égale (0) à cause de la faible capacité de rétention du sol de la région.

S : Surface du périmètre en (ha).

e : Rendement de la méthode d'irrigation ; 0,9 pour le cas de goutte à goutte et 0,5 dans le cas de l'irrigation de surface [68] [69].

Nj : Nombre de jour du mois.

Période	L'hiver			Le printemps			L'été			L'automne		
	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov
Kc	0,9	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95	1	1	1	0,95	0,95	0,95
Etp	157,4	91,5	115,1	238,1	238,1	288,8	341,4	398,4	351,2	246	169,9	12,4
V	25,38	14,75	20,55	30,85	41,88	49,16	63,22	71,39	62,94	43,28	28,92	19,77
n	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30

Tableau 4.11 : Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare.

- V : Volume d'eau journalier (m³/j)
- Etp : Evapotranspiration (mm)
- n : Nombre de jour

3.2. Rayonnement solaire :

Le tableau ci-après donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site de Ghardaïa [70] :

Période	L'hiver			Le printemps			L'été			L'automne		
	Mois	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O
\bar{H}_{Tot} KW h/m ² /j]	3,4	3,9	4,8	5,9	7,3	7,7	7,8	7,5	7,1	6,0	4,8	4,0

Tableau 4.12 : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle de Ghardaïa

3.3. Hauteur manométrique totale :

Pour notre station de pompage, nous avons choisi une hauteur manométrique totale de 60m. Elle correspond à la nappe phréatique de la région plus l'élévation du réservoir et les pertes de charges dues à la tuyauterie.

$$H_{MT} = H_g + \Delta P$$

$$H_g = A + B + C$$

$$A=10m ; B=30m ; C=14m ; \Delta P= 0,1.H_g$$

3.4. Dimensionnement de la station de pompage :

Le dimensionnement du système de pompage PV concerne : le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de l'onduleur répondants au service requis dans les conditions de référence dépendent des deux conditions suivantes [71] :

- Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus faible.

Pour notre exemple, le débit journalier maximal requis est de **71,39** (m³/j) pendant le mois de juillet et l'énergie d'ensoleillement la plus faible pour la saison d'été est égale à 7100 [Wh/m²/j] pendant le mois d'août.

3.5. Choix de la pompe :

Nous choisissons la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique total [45].

- **Débit horaire :**

Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q(\text{m}^3/\text{jour})}{h} \quad (4.2)$$

Avec h : le nombre d'heur d'ensoleillement maximal.

Dans notre cas, nous prenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} H=7 \text{ heures} \\ Q= 71,39 \text{ (m}^3/\text{j)} \end{array} \right.$$

Par conséquent, le débit horaire est le suivant :

$$Q_h = 10,2\text{m}^3/\text{h}$$

- **Rappelons que la hauteur manométrique totale est de 60 m.**

Pour notre étude, le choix de la motopompe utilisée est porté sur une gamme de pompes immergées proposées par le constructeur PANELLI. Cette gamme est constituée de pompes de dimensions différentes. Chaque type de pompe est disponible avec un nombre de roues variables afin d'obtenir le point de fonctionnement requis. Les types des pompes sont donnés dans le tableau suivant :

Type de pompe	P	η_{mp} (%)	Q	H(m)							
				0,0	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12
95 PR8 N/04	0,75	60	H(m)	27	25	23	22	20	17	14	10
95 PR8 N/07	1,10	60		47	44	40	39	35	30	25	18
95 PR8 N/09	1,50	60		61	56	52	50	45	38	32	23
95 PR8 N/13	2,20	60		88	81	75	72	65	55	46	33
95 PR8 N/17	3,00	60		115	106	98	94	85	72	60	43
95 PR8 N/23	4,00	60		155	144	132	127	115	98	81	58
95 PR8 N/31	5,50	60		209	194	178	171	155	132	109	78
95 PR8 N/42	7,50	60		284	263	242	231	210	179	147	105

Tableau 4.13 : Caractéristiques électriques d'une gamme de pompes PANELLI [72].

- Q : Débit (m^3/h)
- P : Puissance (Kw)

Selon nos besoins, d'une part, un débit horaire de **10,20 m^3/j** , et une hauteur manométrique totale de **60 m**. D'autre part, la motopompe adéquate sera alors la pompe **95PR8N/17**. La figure (5) ci-dessous illustre ses caractéristiques techniques.

Les dimensions de la pompe :

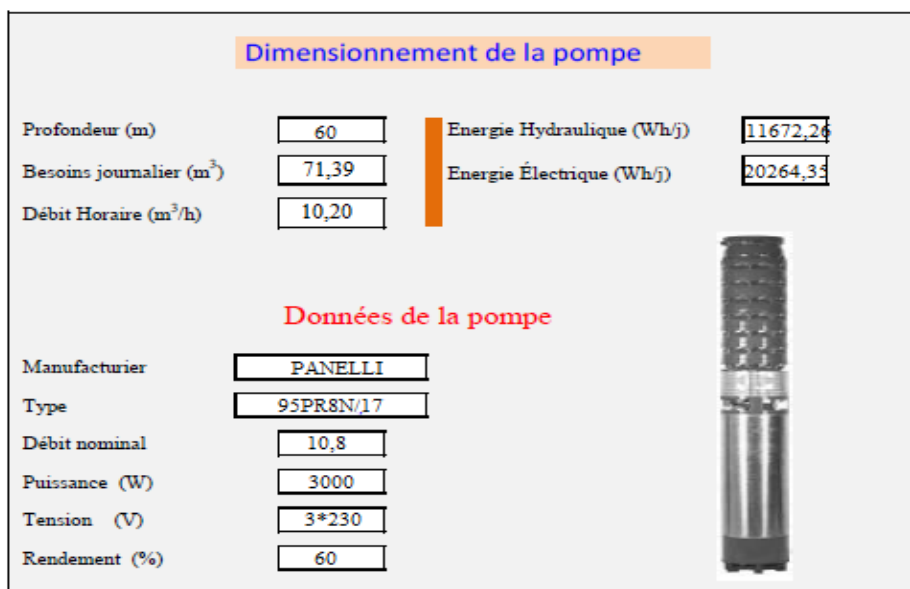


Figure 4.5 : Caractéristiques électriques de la pompe 95PR8N/17.

3.6. La capacité du réservoir :

Rappelons que la technique de pompage choisi pour notre cas est le pompage dit « au fil de soleil ». Le stockage de l'eau est effectué dans un réservoir. La capacité de ce dernier est calculée pour répondre au besoin d'eau pendant les jours d'autonomie. Celui-ci varie d'un à plusieurs jours. Pour notre exemple, la capacité de stockage est calculée pour assurer deux jours d'autonomie.

3.7. Le convertisseur DC/AC (onduleur) :

Il a pour rôle, la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif identique à celui du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension). Pour le besoins de notre étude, le convertisseur choisit est présenté dans le tableau suivant [73] :

Type d'onduleur	Puissance MAX	Tension de l'Entrée(V)	Tension de Sortie(V)	Fréquence (Hertz)
Solardrive 4000	4000	240	3*220	0 :65

Tableau 4.14 : Caractéristiques électriques de l'onduleur [73].

3.8. Taille du générateur PV :

Pour cela nous avons choisi le modèle photovoltaïque CEM250M-60 de chez Condor Electronic. La série CEM de Condor [74] fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 60 cellules solaires Monocristalin connectées en série pour produire une puissance maximale de 250 W.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale (P_{max})	250 W
Tension à P_{max} (V_{mp})	30,9 V
Courant à P_{max} (I_{mp})	8,28 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	9,005 A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	37,24 V
Coefficient de température de I_{sc}	0,06%/°C
Coefficient de température de V_{oc}	-0,36%/°C
Coefficient de température de puissance	0,36%/°C
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	45+/- 2°C

Tableau 4.15 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque CEM250M-60 [75].

Selon la puissance demandée par le groupe moteur-pompe et l'irradiation journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale que doit fournir le générateur PV est calculée par l'expression suivante [45] :

$$P_c = \frac{G}{F_m [1 - \gamma(T - T_r)] G_d(\beta)} \cdot \frac{E_h}{\eta_{Mp} \eta_{Ond}} \quad (4.3)$$

G : L'éclairement dans les conditions CSM.

F_m : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximale, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances R_s et R_{sh}.

$$FF = P_m / (V_{co} \cdot I_{cc}) \quad [46].$$

γ : Coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

Pour notre cas on a pris la température moyenne la plus élevée : T (mm) = 35°C

T_{ref} : La température de référence, 298k (25°C).

E_h : Énergie hydraulique [Kwh/j].

Ou η_{mp} , η_{Ond} , sont respectivement, les rendements du groupe motopompe, de l'onduleur.

$\eta_{mp}= 0,6$; $\eta_{Ond}= 0,96$

$Gd(\beta)$: L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β [kwh/m²/j] pour notre cas : $Gd(\beta)= 7100 \text{ Wh/m}^2/\text{j}$ [70].

$$F_m = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (4.4)$$

$$F_m = \frac{250}{9,005 \cdot 37,24}$$

$$F_m = 0,754$$

$$P_c = \frac{1000}{0,754[1 - (3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10)] \cdot 7100(\beta)} \cdot 20264,35$$

$$P_c = 3971,46 \text{ W}$$

3.9. Nombre de modules

Le nombre total de modules (N_M) constituant le générateur PV est calculé par la formule suivante :

$$N_M = \frac{P_c}{P_M} \quad (4.5)$$

Avec :

P_c : La puissance crête du générateur.

P_M : La puissance du module PV.

$$N_M = 15,88 \text{ Soit } 16 \text{ modules}$$

3.9.1. Nombre de modules en série :

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

$$N_{ms} = \frac{V_{ch}}{V_M} \quad (4.6)$$

$$N_{ms} = \frac{240}{30,9}$$

$$N_{ms} = 7,76 \text{ soit } 8 \text{ modules en série}$$

Avec :

V_{ch} : La tension nominale de la charge (l'onduleur).

V_M : La tension nominale du module.

3.9.2. Nombre de module en parallèle :

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_{Mp} = \frac{I_m}{I_s} \quad (4.7)$$

$$I_m = \frac{P_{max}}{V} = \frac{4000}{240}$$

$$I_m = 16,67 \text{ A}$$

$$N_{Mp} = \frac{16,67}{8,28}$$

$$N_{Mp} = 2,01 \text{ soit } 2 \text{ modules en parallèle}$$

I_m : Le courant nominal de la charge (l'onduleur)

I_s : Courant à puissance maximale (I_{max})

Le générateur photovoltaïque à installer sera constitué de 16 modules de 250W et 30,9V dont deux branchements de 8 modules en série connecté en parallèles.

3.9.3. Schéma de branchement :

Schéma de branchement

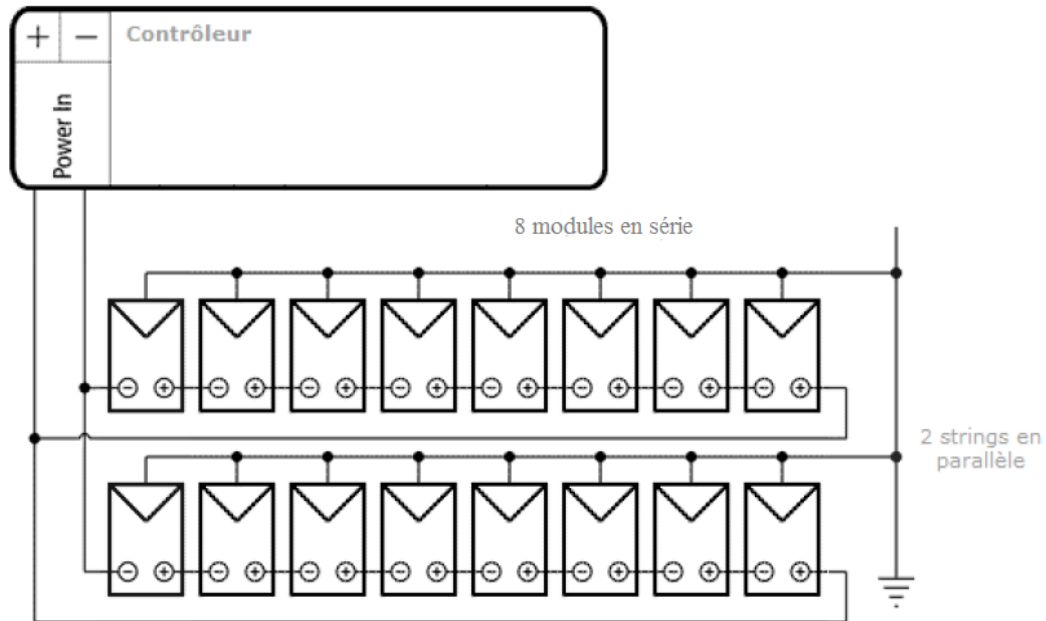



Figure 4.6 : Schéma de branchement.

3.9.4. Correction de la puissance crête :

Dans la plupart des cas, les nombres de modules (en séries et/ou en parallèles) calculés ne sont pas des entiers. Il faut donc les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

Les dimensions du générateur :

Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque



Caractéristiques du site		Caractéristiques du Module	
Lieu du projet	Ghardaia	Puissance nominale (W)	250
Latitude du lieu °N	32	Tension nominale (V)	30.9
Rayonnement solaire (W/m ²)	7100	Facteur de couplage (%)	75.4
Température Moyenne (°C)	35	Courant nominal (I)	8,28

Taille du Générateur

Energie électrique (Wh/j)	20264,35	Nombres de modules	15
Tension de sortie (V)	240	Modules en série	8
Puissance crête (W)	3971,46	Modules en parallèle	2
Surface du générateur (m ²)	27	Nombres de modules corrigée	16
Puissance du module (W)	250	Puissance crête corrigée (W)	4000

Figure 4.7 : Schéma du calcul de la taille du générateur.

Comme nous pouvons constater à partir l'écran ci-dessus, en se basant sur la connaissance des conditions spécifiques du site (système de pompage), de l'énergie consommée et des caractéristiques des modules PV choisis, nous calculons la taille du générateur photovoltaïque destiné à l'irrigation de la surface concernée (un hectare du palmier Dattier à Ghardaïa pour notre exemple).

3.10. Le mode d'irrigation proposé:

Les techniques d'irrigation choisies pour le périmètre en projet, est le « goutte à goutte ». L'utilisation de cette technique pour les zones sahariennes permet d'obtenir de bons résultats, que ce soit sur le plan production, ou sur le plan hydraulique (meilleure efficacité).

3.10.1. Exigence de la culture :

La superficie de l'exploitation est de 1 ha. Sa longueur est de 200 m et sa largeur de 50m.

Chaque ligne de plante sera irriguée à partir d'une rampe de longueur $L_r=50\text{m}$ portant des goutteurs espacés de $E_g=10\text{m}$

Le nombre de goutteurs par rampe : $N_g=L_r/E_g=50/10=5$ (4.8)

Le nombre de rampe: $N_r=19$ (4.9)

Le nombre de secteurs : $N_b=1$ (4.10)

La superficie de l'exploitation est divisée en un seul secteur d'arrosage comme le montre la figure 4.8, ci-dessous, représentant le plan parcellaire.

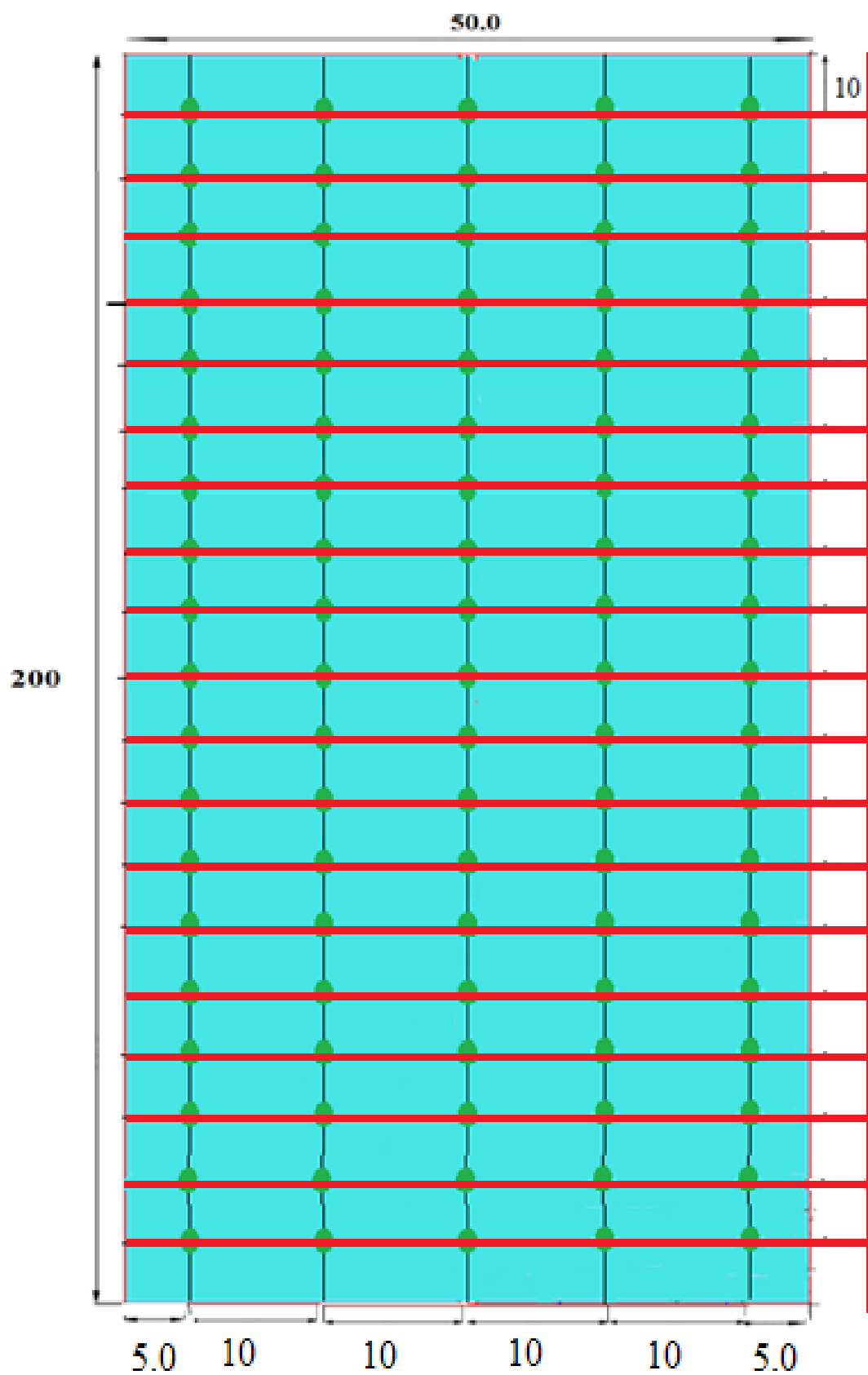


Figure 4.8 : Plan parcellaire du site

3.10.2. Dimensionnement de la conduite principale :

Les calculs ont été faits à l'aide de la table de coolbrook (Annexe –D-) et de l'outil informatique Excel.

<i>L m</i>	<i>S (ha)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>D (m)</i>	<i>D (mm)</i>	<i>D norme</i>	<i>e PE100PN 10 sdr17</i>	<i>v th m/s</i>
200	1	1,65	0,059	6	63	4	0,6
<i>v reel m/s</i>	<i>pdc</i>	<i>pdc T</i>	<i>C.T.N</i>		<i>PIEZO.</i>		<i>P m</i>
			<i>amont</i>	<i>aval</i>	<i>amont</i>	<i>aval</i>	
0,529	0,01738	3,476	464	464	479	475,524	11,524

Tableau 4.16 : Calcul hydraulique du porte rampe.

L: Longueur (m)

S : Surface (ha)

Q : Débit (l/s)

D : Diamètre (mm)

P : Pression (m)

Nous estimons que le système fonctionnera durant 12h pendant la journée, les études précédentes nous ont permis de déterminer un débit maximal journalier de 71,39m³/j durant l'année, un forage de 50 m de profondeur, une pompe caractérisée par un débit crête de 10,8 m³/h et une hauteur manométrique de 60m. Installé à 10m de hauteur, le réservoir dimensionné a une capacité de 140m³ avec une charge de 5 m d'eau. Il peut assurer deux jours d'autonomie.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'une étude qui a conduit au dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour irriguer un hectare de palmiers située à l'URAER Ghardaïa. Nous avons présenté les différents éléments de ce système photovoltaïque qui sont : un générateur photovoltaïque, une électropompe et un onduleur.

Selon l'étude, le générateur photovoltaïque adéquat est constitué de 16 modules photovoltaïques en monocristallin d'une puissance crête de 250 WC chacun. Ainsi, la puissance crête du générateur PV est de 4000 WC.

Pour cette puissance crête installée, durant toute l'année nous aurons des quantités d'eau supplémentaires pompées dans les mois où la demande en eau des palmiers est faible, comme le montre la figure suivante :

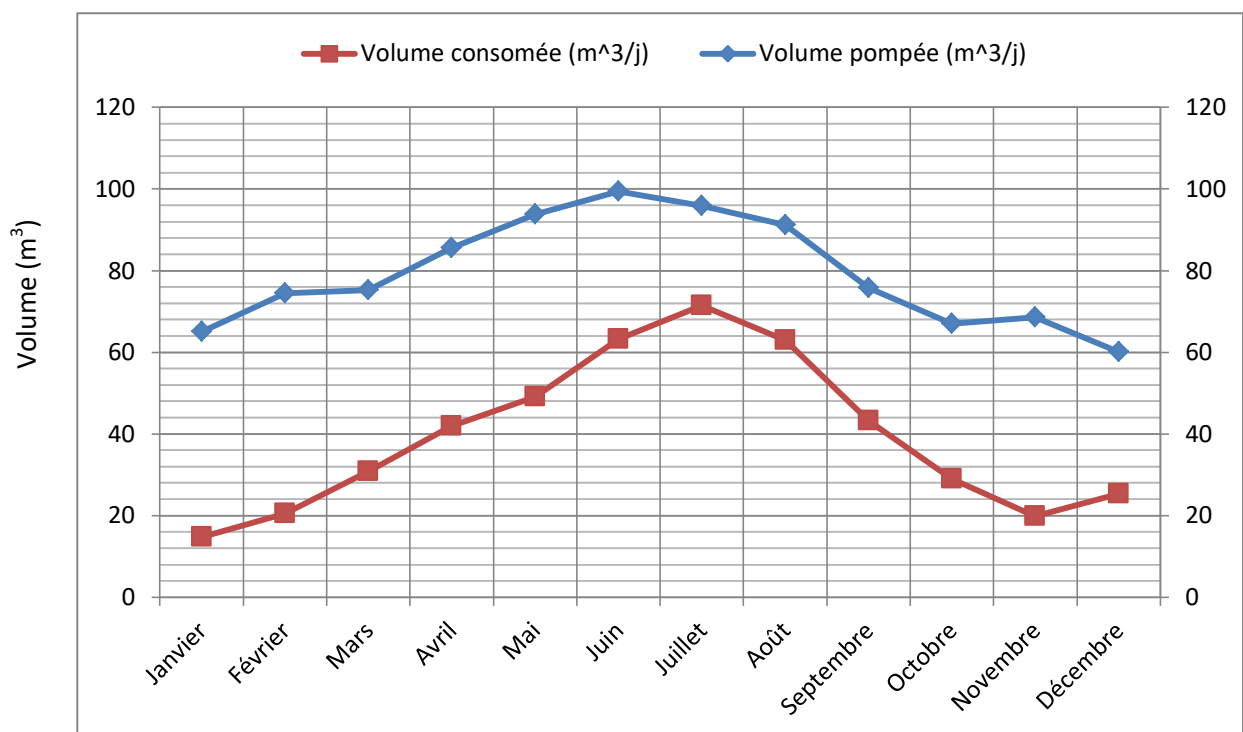


Figure 4.9 : Volume d'eau pompée et volume d'eau consommée.

Pour résoudre le problème des eaux supplémentaires pompées qui ont une valeur moyenne de 14550 m³/an, on laisse la puissance installée sans changement et pour les mois qui ont des demandes d'eau des palmiers inférieures à la quantité pompée par le système, nous proposons l'implantation d'autres cultures. Par exemple les cultures sous serre comme la Courgette ou le Poivron. Ces cultures ont leur cycle de végétation entre octobre et mai et nécessitent une quantité d'eau de l'ordre de 7002.7 m³/ha/an [76].

Mois	Seb	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	
les cultures							Palmier dattier						
	Cultures Maraichères											Culture	
							aubergine - Poivron - tomate- courgette - cucurbitacées					la laitue - oignon - carotte	
			culture sous serre										
	fourrage						fourrage						
					Les Arboricultures								

Direction d'agriculture Ghardaïa

Tableau 4.17 : Le cycle de végétation des cultures

Conclusion général

Ce travail a été consacré à une étude analytique des éléments constitutifs d'un système de pompage photovoltaïque pour une irrigation goutte à goutte dans le site de Ghardaïa. On peut rapidement comprendre et justifier le choix de l'énergie solaire.

D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, abondante et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

D'autre part l'Algérie (les zones du sud en particulier) dispose d'un potentiel solaire énorme avec un ensoleillement de plus de 5KWh/m²/jour avec une durée pas moins de 7h par jour.

Aussi, la demande d'énergie électrique, essentiellement dans les zones rurales et agropastorales ne cessent d'augmenter, en particulier les systèmes de pompage d'eau. Classiquement le pompage de l'eau dans ces régions se faisait par des groupes électrogènes. Mais ce système de pompage présente plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesel, et cela revient de plus en plus cher aux citoyens.

D'après des études menées par des experts en la matière, la technique de pompage par énergie solaire photovoltaïque semble être très avantageuse et son exploitation est moins coûteuse. La problématique majeure de l'énergie solaire reste le coût de l'investissement initial et le nombre d'années avant rentabilité par rapport au pompage par groupe électrogène.

Dans le cas étudié, le système de pompage solaire est conçu pour un approvisionnement en eau dit « au fil du soleil ». C'est-à-dire la pompe fonctionnera seulement la journée. L'installation d'un réservoir de stockage d'eau est indispensable pour la continuité d'irrigation dans la nuit. Parce qu'il

est plus économique de stocker l'eau dans des réservoirs hydrauliques au lieu de stocker l'énergie électrique dans des batteries.

Le choix des panneaux solaires et de la motopompe dépend de plusieurs paramètres importants : tension, puissance, la puissance nécessaire pour le pompage, la hauteur manométrique totale, le débit, etc.

Enfin, suite à la crise actuelle du pétrole et l'augmentation incontrôlée des prix des carburants, l'Algérie doit impérativement se tourner vers les énergies renouvelables et en particulier le solaire.

Par conséquent, le développement de ce type d'énergie décentralisée, en particulier dans le sud de notre pays, est très recommandé, car il permet l'accès à l'électricité et à l'eau, dans n'importe quel endroit, de façon aisée, à moindre coût et sans pollution. Aussi, il permet le développement de l'agriculture dans les zones rurales, ce qui crée du travail et permet la sédentarisation des populations.

Bibliographie

- [1] J.M Chassériau: Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [2] R. Bernard & al: Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2^{ème} édition 1980.
- [3] S. Saadi : Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [4] J.A Duffie & W.A Beckman: Solar Energy Thermal Processes; 2nd edition, Wiley Interscience, New York, 1974.
- [5] J.A Duffie & A.Beckman: Solar engineering of thermal processes; John Wiley and Sons, (1980).
- [6] M. Capderou : Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [7] A. Mefti & al : Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre 2002.
- [8] MARIE LAURE LAMY : " efficacité des politiques environnementales d'incitation a l'adoption de nouvelles techniques le cas des énergies renouvelables" ; Thèse de doctorat GRENOBLE 2004.
- [9] N. Said : Potentiel EnR de l'Algérie ; CDER.
- [11] [http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Programme National/Programme-National-Energies-Nouvelles-Renouvelables.pdf](http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Programme_National/Programme-National-Energies-Nouvelles-Renouvelables.pdf)
- [12] MOHAMED ARROUF, Thèse de Doctorat « Optimisation De L'ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branche Sur Un Générateur Photovoltaïque » Université Mentouri De Constantine, 2007.
- [14] www.mem-algeria.org
- [15] M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Office des publications universitaire Tome 1' Tome 2, Algérie 1986.
- [16] M.Louazene : Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ; Magister en Electrotechnique ; Univerisité Batna, 2008.

- [17] J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [18] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.
- [19] A.Reteri,A.Fentrouci :Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP ;Master en génie Thermique et Energies Renouvelables ;Université de Tlemcen, 2013.
- [20] <http://www.climamaison.com/lexique/energies-fossiles.htm>
- [21] <http://utilisationdesenergies.blogspot.com/>
- [22] <http://lewebpedagogique.com/svt3ic/energie/energies-renouvelables-et-energies-fossiles/>
- [23] <http://utilisationdesenergies.blogspot.com/>
- [24]http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/sources_d_energie_renouvelable.pdf
- [25]<https://www.planetoscope.com/energie-hydraulique/1377-production-mondiale-d-energie-hydraulique.html>
- [26] H. Atmania : La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie Cas de la photovoltaïque ; Mémoire de magister en management ; Université d'Oran, 2015.
- [27]http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20Energie%20ER02%20Part%20FR
- [28] <http://utilisationdesenergies.blogspot.com/>
- [29] Hann Maristes : Les énergies renouvelables Les bases, la technologie et le potentiel au Sénégal ; Dakar, Avril 2011.
- [30]<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire>
- [31] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaique-et-le-solaire-thermique>
- [32] F. Lasnier, T. G. Ang : « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.

- [33] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaïque-et-le-solaire-thermique>
- [34] B. Flèche, D. Delagnes : « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.
- [35] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.
- [36] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [37] O.Benchikh, M Moubri : Maintenance de systèmes solaires photovoltaïques pour le pompage d'eau, Volume 1.
- [38] LARY LIGRING : ' Etude pour la mise en place du système de pompage solaire d'un champ de neuf hectares pour une irrigation Goutte à Goutte à SEHEBA au Tchad ' ; Mémoire de Master-Tchad, 2012.
- [39] A. Labonne, « Alimentation d'une pompe à Burkina Faso »,2004.
- [40] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [41] Hassan ELATTIR, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, - « LA CONDUITE ET LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION GOUTTE A GOUTTE EN MARAICHAGE ». Mensuel MADRPM/DERD N°124 - Rabat, Janvier 2005.
- [42] R.Bouillot : Hydraulique agricole, 1990.
- [43] M.Poirée, Ch, Illier :Irrigation les réseaux d'irrigation théorique, technique et économie des arrosages,1971.
- [44] KY Thierry, S. maurice : Système photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte à goutte ; DEA en Physique Appliquée ; Université de Ouagadougou-Burkina Faso, 2007.
- [45] A. Hadj Arab, M. Benganem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 –26.

- [46] T.Ben aoun,S.Mouissi ;'Etude d'un système couplant un générateur photovoltaïque et une charge electrolytique' ; Mémoire Master ; Université Ouragla,2015.
- [47] K.Gairra,Y.Bakelli : Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaïa Region ,2013 .
- [48] K. Gairaa, Characterization and evaluation of solar radiation in Ghardaïa site [M.S. thesis], University of Annaba, Annaba, Algeria, 2012.
- [49] Lakhdar CHEBIHI: Adaptation des pompes immergées destinées à l'irrigation dans les zones arides ; Thèse de Magister, 2011.
- [50] www.unesco.org
- [51] www.elwatan.com
- [52] M.Bouhamida : Conduite de l'élevage bovin laitier dan la région de Ghardaïa Cas de la ferme d'El-Atteuf ; Mémoire de fin d'étude ; Université de Ouargla, 2014.
- [53] F.Dahou : Etude des sols alluvionnaires de Oued Metlili ; Mémoire de fin d'étude ; Université de Ouargla, 2014.
- [54] A.Khelifa :' Etude du système ancestral de captage de distribution des eaux dans l'oasis de Ghardaïa' ; Mémoire de Magister ; Université de Ouargla ,2008.
- [55] CASTANY G., 1982 – Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed : DUNOD, Paris.233 p.
- [56] LATRECH D., 1997 - Eaux et sols d'Algérie. Ed : A.N.R.H., Alger. 60p.
- [57] M.Taleb Bahmed ;'Evaluation hydrochimique des eaux souterraines de la vallée du M'Zab : Cas de la région d'El-Atteuf' ; Mémoire d'ingénieur ; ENSA, 2008.
- [58] M.Khemgani :' Caractérisation des sols alluviaux et de la nappe alluviale de l'oasis de Guerrara ; Mémoire Magister; Université de Ouargla, 2010.
- [60] T.Maamri et D.Meddah:'Inventaire des orthoptères dans deux régions phoenicoles (Ghardaïa et Ouargla)' ; Mémoire Master ; Université de Ouargla, 2013.
- [61] G. Toutain:'Le palmier dattier culture et production' ; Edition Al Awamia, 25 octobre 1967.

- [62] Congrès sur les énergies renouvelables ; C.E.M.E ; pp12 – 18 ; Biskra, 1997.
- [63] Zvonimir Glasnovic et Jure margeta ; ‘A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems’ ; Solar energy 81, pp 904 – 916, 2007.
- [64] A.Djafour :’ Etude d’un système de pompage photovoltaïque pour l’irrigation d’une palmeraie à Ouargla’ ; Projet de fin d’étude ; Université de Constantine.
- [65] Naum Fraidenraich, Heitor et S.costa ; ‘Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system’; Solar and wind Technology ; Vol. 5, N°2, pp121-126, printed in Great Britain, 1988.
- [66] Daniel Dubost ; ‘Pratique de l’irrigation au Sahara’ ; commissariat régional de développement Agricole ; Tozeur, Novembre 1994.
- [67] L’Hévéa. (D’après physiology of Rubber tree Latex, J. d’Auzac , J.-L. Jacob et H. Chrestin)
- [68] Manuelle d’irrigation ;C.Masmoudi ;Ecole supérieure d’agriculture de Mograne, Zaghouan,2012
- [69] C. Ollier et M. poirée ; ‘Irrigation, les réseaux d’irrigation théorie, technique et économie des arrosages’ ; Eyrolles ; Paris, 1983.
- [70] Research Article :Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Gharda\ Region Kacem Gairaa and Yahia Bakelli, 23 February 2013
- [71] B. Azoui et M. Djarallah, « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [72] www.panellipumps.it
- [73] www.grundfos.com Par Louzene Mohammed Lakhdar, 2008.
- [74] http://www.ero-energies.com/Files/isf_240_245_250_fr.pdf
- [75] www.condor.dz SPA Condor Electronics Division Énergies Renouvelables

[76] M.T. Benharzallah ; 'Essai de différentes doses d'engrais azotés (fumure de couverture) sur poivron sous serre dans la région de Ouargla' ; Mémoire d'ingénieur d'état ; I.N.F.S.S Ouargla, 1989.

Annexe

Annexe –A-

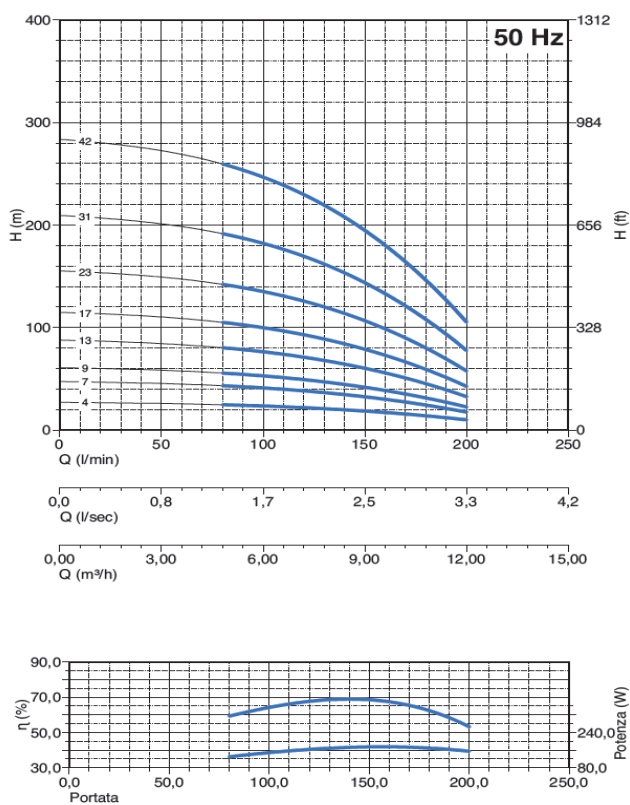
Les courbes de performances de la pompe PANELLI 95PR8 N/4



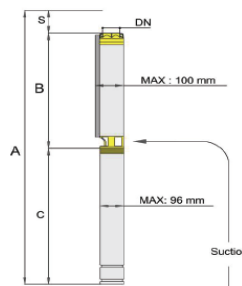
95 PR8 N (4")

CE Tolleranze secondo - Tolerance according to - Tolerances selon
Tolerancias según norma EN UNI-ISO 9906 - 4" (100 mm)

95 PR N



- H = Prevalenza totale. Da 10 a 263 m
Q = Portata. Da 80 a 200 l/min
η% = Rendimento della pompa. Max 69,0 %
W/st = Assorbim. per stadio. Max 174,00
Massimo contenuto di sabbia. 300 g/m³
S = Battente minimo (m) Max 1
- H = Total head. From 10 to 263 m
Q = Capacity. From 80 to 200 l/min
η% = Pump efficiency. Max 69,0 %
W/st = Stage absorption. Max 174,00
Maximum sand content 300 g/m³
S = Minimum head (m) Max 1
- H = hauteur manométrique. From 10 to 263 m
Q = Débit. From 80 to 200 l/min
η% = Rendement de la pompe. Max 69,0 %
W/st = Absorption par étage. Max 174,00
Contenu maximal de sable. 300 g/m³
S = Niveau minimal (m). Max 1
- H =Altura manométrica. Da 10 a 263 m
Q = Caudal. De 80 a 200 l/min
η% = Rendimiento de la bomba. Max 69,0 %
W/st = Potencia absorbida por etapa. Max 174,00
Contenido máximo de arena. 300 g/m³
S = Nivel mínimo (m) Max 1



DN : TYPE 95 PR 1
TYPE 95 PR 2
TYPE 95 PR 3
TYPE 95 PR 4
= 1" 1/4 GAS

DN : TYPE 95 PR 6
TYPE 95 PR 8
TYPE 95 PR 10
TYPE 95 PR 12
TYPE 95 PR 15
= 2" GAS

Tipo - Type	Motore - Motor - Moteur Caratteristiche a 2900 rpm					Q=Portata - Capacity - Debit														
	Power		Mono Fase Single phase V230		V 400	l/min	0	80	100	120	140	160	180	200						
	kW	HP	A	μF	A	l/sec	0,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33						
95 PR8 N/04	0,75	1	6,5	30	2,2		0,0	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0						
95 PR8 N/07	1,10	1,5	9,6	40	3,1		27	25	23	22	20	17	14	10						
95 PR8 N/09	1,50	2	11,8	50	4		47	44	40	39	35	30	25	18						
95 PR8 N/13	2,20	3	15,2	76	5,8		61	56	52	50	45	38	32	23						
95 PR8 N/17	3,00	4	-	-	7,5		88	81	75	72	65	55	46	33						
95 PR8 N/23	4,00	5,5	-	-	9,8		115	106	98	94	85	72	60	43						
95 PR8 N/31	5,50	7,5	-	-	13,5		155	144	132	127	115	98	81	58						
95 PR8 N/42	7,50	10	-	-	17,5		209	194	178	171	155	132	109	78						
							284	263	242	231	210	179	147	105						

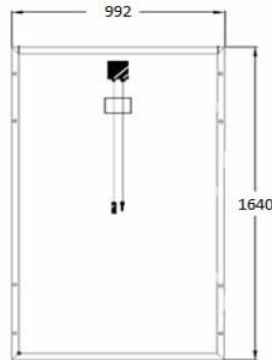
Dimensioni di ingombro e pesi Overall dimensions and weights								
Tipo - Type	A mm Mono	A mm Tri	B mm	C mm Mono	C mm Tri	M kg Mono	M kg Tri	P kg
95 PR8 N/04	643	618	281	362	337	10	10	3
95 PR8 N/07	783	733	371	392	362	12	12	4
95 PR8 N/09	853	823	431	422	392	13	13	4,5
95 PR8 N/13	1040	1025	573	467	452	15	15	6
95 PR8 N/17	0	1250	693	0	557	0	19	7,5
95 PR8 N/23	0	1470	873	0	597	0	22	8,5
95 PR8 N/31	0	1833	1135	0	698	0	27	11
95 PR8 N/42	0	2305	1487	0	818	0	32	15

Annexe -B-

Caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques Condor 250/255/260 :

Module Photovoltaïque Monocristallin 60 Cellules

Caractéristiques physiques (mm) :



Caractéristiques électriques :

	Unité	Module		
Puissance nominale	W	250	255	260
Voltage Circuit ouvert (Vco)	V	37.24	37.36	37.42
Courant de court Circuit Isc	A	9.005	9.016	9.025
Tension mpp Vmpp	V	30.9	31.19	31.48
Courant mpp Impp	I	8.28	8.37	8.44
Système voltage max VDC	V		1000	
Charge maximale De fusibles (A)	A		15	
Facteur de température (cellule):				
Température nominale de fonctionnement	NOCT		45±2°C	
Coefficient de température de puissance	%/°C		-0,36	
Coefficient de température de courant	%/°C		+0,06	
Coefficient de température de voltage	%/°C		-0,36	

Caractéristiques mécaniques :

Type de cellule	Cellule monocristalline avec anti-reflection
Nombre de cellules par module	60 Cellules (6x10)
Dimensions de la cellule	156x156 mm
Dimensions du module	1640x992x45 mm
Poids du module	17,5 kg
Cadre	Alliage en aluminium anodisé
Type de verre	Verre trempé, 3.2 mm d'épaisseur
Boite de jonction et connecteur	IP65, 3 Diodes By-passe et câbles compatibles avec un connecteur MC4
Température d'utilisation	- 40°C à 85°C

STC: 1000 w/m², AM1.5 et 25°C température de la cellule; NOCT: nominal operating cell temperature

Annexe –C-

Photo prise du site d'étude :



Photo 1 : terrain du plein champ.



Photo2 : Terrain de la sous serre.

Résumé

L'eau et l'énergie sont des éléments essentiels au développement d'un pays et indispensables à la vie. La demande croissante de l'énergie et l'épuisement futur inévitable des sources d'origine fossiles exigent l'utilisation de sources renouvelables.

L'énergie solaire est abondante en Algérie et en particulier au sud où la durée d'ensoleillement dépasse les 10 heures par jour. Les régions de l'intérieur de l'Algérie souvent à vocation agropastorale, peuplées de façon éparse, ayant un climat chaud et sec en été et froid en hiver sont caractérisées par de longues périodes de sécheresses et des besoins accrus en eau pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et le cheptel.

Ce travail est une étude technique d'une station de pompage d'eau, fonctionnant à l'énergie électrique produite par le solaire, photovoltaïque, au niveau de la wilaya de Ghardaïa, pour l'irrigation.

L'utilisation de ce type d'énergie propre et décentralisée contribue au développement de l'économie de la zone.

Mots clés : Pompage solaire, Effet photovoltaïque, Pompe, Irrigation, Besoins de palmier dattier, Ensoleillement, Goutte à goutte, Algérie.

ملخص

المياه والطاقة أمر حيوي لتطوير البلاد وضرورية في الحياة. الطلب المتزايد على الطاقة ومستقبل استنفاد لا مفر منه من الأصل الأحفوري تتطلب استخدام مصادر الطاقة المتجددة.

الطاقة الشمسية وفيرة في الجزائر وخاصة في الجنوب حيث تجاوزت مدة سطوع الشمس 10 ساعة في اليوم. وتتميز المناطق الداخلية من الجزائر في كثير من الأحيان الزراعية الرعوية، ذات الكثافة السكانية المنخفضة، مع مناخ حار وجاف في الصيف وباردة في الشتاء فترات طويلة من الجفاف وزيادة الاحتياجات المائية للأغذية المياه الصالحة للشرب والزراعة والثروة الحيوانية.

هذا العمل هو دراسة تقنية لمحطة ضخ المياه، والمدعوم من الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية، والضوئية، في ولاية غرداية، لأغراض الري.

استخدام هذا النوع من، الطاقة اللامركزية نظيفة يساعد على تطوير الاقتصاد في المنطقة.

كلمات البحث: ضخ الشمسية، وتأثير الضوئية، مضخة الري والاحتياجات النخيل النخيل، وأشعة الشمس، بالتنقيط، الجزائر

Summary

Water and energy are essential to the development of a country and indispensable to life. The increasing demand for energy and the inevitable future depletion of fossil fuels require the use of renewable sources. Solar energy is abundant in Algeria and especially in the south where the duration of sunshine exceeds 10 hours per day. Inland Algeria, which is often agropastoral, scattered, with a hot, dry climate in summer and cold in winter, are characterized by long periods of drought and increased water requirements for food Drinking water, agriculture and livestock. This work is a technical study of a pumping station of water, working on the electric energy produced by the solar, photovoltaic, in the wilaya of Ghardaïa, for irrigation. The use of this clean and decentralized energy contributes to the development of the economy of the area.

Key words: Solar pumping, Photovoltaic effect, Pump, Irrigation, Date palm needs, Sunshine, Drip, Algeria.