

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



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Par : CHAFAI Issam Eddine

Sujet

Utilisation d'un outil de calcul pour l'optimisation d'une étude technicoéconomique de l'irrigation par une station de pompage solaire, photovoltaïque, d'une palmeraie.

Soutenu publiquement, le 08/06/2023, devant le jury composé de :

Mme BELARBI Fadila	MCA	Université Tlemcen	Présidente
M. BENMANSOUR Abdelhalim	Professeur	Université Tlemcen	Encadreur
M. TERKI HASSAINE Taha Amine	MCB	Université Tlemcen	Co-Encadreur
M. BENADDA Lotfi	MCB	Université Tlemcen	Examineur



Remerciements

Avant tout, louange à Dieu le miséricordieux, qui nous a donné savoir, force et patience pour faire cet humble travail. Tous mes remerciements vont à toute personne, qui de loin ou de près, a contribué à l'aboutissement de ce travail.

Par ailleurs, je tiens à remercier mes deux encadreurs Mr. BENMANSOUR Abdelhalim et Mr. TERKI HASSAINE Taha El Amine, pour leurs gentillesse, dévouement, travail et leurs judicieux conseils.

Enfin, je remercie chaudement, les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.



Dédicace

Je dédie, ce modeste travail à mes parents, qui m'ont soutenu sans cesse, tout au long de ce périple, afin que je puisse terminer, mes études et faire aboutir ce travail en leur vivant.

A mes chers défuntés, ma grand-mère et ma grande tante, à ma famille et à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé, pour terminer ce noble travail.

Résumé :

Le système d'irrigation goutte à goutte est très utilisés dans les zones arides à fort ensoleillement. Ajouté à cette technique d'irrigation l'alimentation énergétique solaire photovoltaïque donne à notre système étudié de l'autonomie, de l'économie de l'eau et de l'énergie ainsi que la préservation de l'environnement. Notre étude a porté sur la numérisation et le dimensionnement d'un système d'irrigation goutte à goutte par puisage solaire photovoltaïque. A cet effet, nous avons choisi un terrain d'un hectare, planté de palmiers dattiers, dans la région de Ouargla, dans la commune de Hassi Ben Abdellah.

Cette ville saharienne dispose d'un fort potentiel solaire et d'une grande réserve d'eau souterraine, qui est la nappe albiennne. Pour pallier au problème de la discontinuité solaire et au stockage de l'énergie dans des batteries, nous avons opté pour le captage et le stockage de l'eau dans un réservoir surélevé, ce qui nous permettrait d'irriguer par écoulement gravitaire ; c'est le pompage dit « **au fil de soleil** ».

Cette étude nous a permis de constater, que le système proposé permet à l'agriculteur des zones sahariennes isolées de ne plus se soucier de la pénurie de carburant pour avoir de l'énergie électrique, de consommer moins d'eau et par conséquent de se concentrer sur le développement et l'amélioration de la production de ses cultures.

Mots clés : irrigation, goutte à goutte, soleil, pompage, photovoltaïque, fil du soleil, dattier, Ouargla.

Abstract :

The drip irrigation system is widely used in arid areas with high sunlight. Added to this irrigation technique the photovoltaic solar energy supply gives our studied system autonomy, water and energy saving as well as environmental preservation. Our study focused on the digitisation and dimensioning of a drip irrigation system using solar photovoltaic energy. To this end, we chose a one-hectare plot of land, planted with date palms, in the Ouargla region, in the commune of Hassi Ben Abdellah.

This Saharan city has a strong solar potential and a large underground water reserve, which is the Albian aquifer. To overcome the problem of solar discontinuity and the storage of energy in batteries, we opted for the collection and storage of water in an elevated reservoir, which would allow us to irrigate by gravity flow; this is the so-called "sunshine pumping".

This study enabled us to note that the proposed system allows the farmer in isolated Saharan areas to no longer worry about the lack of fuel for electrical energy, to consume less water and consequently to concentrate on developing and improving the production of his crops.

Keywords: irrigation, drop by drop, sun, pumping, photovoltaic, thread of the sun, date tree, Ouargela.

ملخص:

يستخدم نظام الري بالتنقيط على نطاق واسع في المناطق القاحلة ذات أشعة الشمس القوية. بالإضافة إلى تقنية الري هذه، فإن مصدر الطاقة الشمسية الكهروضوئية يمنح نظامنا المدروس استقلالية النظام المدروس، وتوفير المياه والطاقة بالإضافة إلى الحفاظ على البيئة. ركزت دراستنا على رقمنة وتحجيم نظام الري بالتنقيط عن طريق الرسم الشمسي الكهروضوئي. ولهذا الغرض اخترنا قطعة أرض مساحتها هكتار مزروعة بأشجار النخيل بمنطقة ورقلة بلدية حاسي بن عبد الله.

تتمتع هذه المدينة الصحراوية بإمكانيات شمسية قوية ومخزون كبير من المياه الجوفية، وهو طبقة المياه الجوفية في ألبان. للتغلب على مشكلة انقطاع الطاقة الشمسية وتخزين الطاقة في البطاريات، اخترنا التقاط المياه وتخزينها في خزان مرتفع، مما يسمح لنا بالري عن طريق تدفق الجاذبية؛ هذا هو الضخ يسمى "فوق الشمس".

سمحت لنا هذه الدراسة بملاحظة أن النظام المقترح يسمح للمزارع في المناطق الصحراوية المعزولة بعدم القلق بشأن نقص الوقود للحصول على الطاقة الكهربائية، واستهلاك كميات أقل من المياه، وبالتالي التركيز على تطوير وتحسين إنتاج محاصيله.

الكلمات المفتاحية: الري، التقطير، شمس، ضخ، فلتائية ضوئية، فوق حط الشمس، نخيل التمر، ورقلة

Liste des figures

N° de la figure	Titre de la figure	Pages
Chapitre I		
Figure I.1	les différentes techniques d'irrigation	05
Figure I.2.	Irrigation par bassins	06
Figure I. 3.	Irrigation par rigole	07
Figure I.4.	Irrigation par gaine souple.	07
Figure I.5.	Irrigation par aspersion	09
Figure I.6.	Irrigation localisée goutte à goutte	10
Chapitre II		
Figure II.1.	Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire	14
Figure II.2.	Conversion de l'énergie solaire en électricité	16
Figure II. 3.	composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct diffus +albédo	17
Figure II. 4.	Classifications des systèmes photovoltaïques	18
Figure II. 5.	Exemple de la structure d'un système PV autonome	18
Figure II. 6.	Système photovoltaïque connecté au réseau	19
Figure II. 7.	Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	21
Figure II. 8.	Un module photovoltaïque	23
Figure II. 9.	Principe de fonctionnement des onduleurs	24
Figure II. 10.	Branchement en parallèle avec un régulateur PWM	25
Figure II. 11.	Branchement en série avec un régulateur MPPT	25
Figure II. 12.	Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique.	28
Figure II. 13.	Pompage au fil du soleil	29
Figure II.14.	Classification des pompes	30
Figure II.15.	La pompe centrifuge	31
Figure II.16.	Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits	32
Figure II.17.	Pompe de surface	33
Figure II.18.	Pompe immergée	33
Figure II.19.	Diagramme du pompage PV par motopompe à CC	34
Figure II.20.	Diagramme du pompage PV par motopompe à AC	35
Chapitre III		
Figure II.1.	Données de base d'une pompe	38
Figure II.2.	pompage d'eau par la technique d'irrigation « goutte à goutte »	41
Figure II.3.	Chaîne de conversion d'un pompage photovoltaïque au fil du soleil	42
Figure II.4.	Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation	47
Chapitre IV		
Figure IV.1.	Carte de la localisation géographique de l'oasis d'Ouargla	50

Figure IV.2.	L'exploitation agricole ITDAS (Google Earth)	51
Figure IV.3.	Type d'irrigation avec pompage photovoltaïque (la micro-irrigation)	61
Chapitre V		
Figure V.1.	schéma représente le réseau d'irrigation localisé	69
Figure V.2.	schéma représente notre palmier	69
Figure V.3.	schéma représente le cheminement le plus défavorable	71
Figure V.4.	Paramètre de site géographique	79
Figure V.5.	Choisira de l'orientation	79
Figure V.6	besoin en eau et hydraulique	80
Figure V.7.	L'eau a besoin quotidiennement et annuellement	80
Figure V.8.	choisir un modèle de pompe	81
Figure V.9.	Choisissez un modèle PV	82

Liste des tableaux

N° de la figure	Titre de la figure	Pages
Chapitre II		
Tableau II.1.	Caractéristique des différentes technologies des cellules PV	21
Tableau II.2.	Les avantages et les inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries	29
Tableau II.3.	Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges	32
Chapitre IV		
Tableau IV.1.	Superficie de l'exploitation agricole ITDAS.	51
Tableau IV.2.	Températures moyennes mensuelles (minimales, maximales et moyennes) de la région étudiée durant la période (1991-2021)	52
Tableau IV.3.	L'humidité moyenne mensuelle de la région étudiée durant la période (1991-2021)	52
Tableau IV.4.	La précipitation moyenne mensuelle de la région étudiée durant la période (1991-2021).	53
Tableau IV.5.	Vitesse moyenne mensuelle des vents à Hassi Ben Abdallah	53
Tableau IV.6.	La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région d'étude durant la période 1991-2021.	53
Tableau IV.7.	L'évaporation moyenne mensuelle de la région d'étude durant la période 1991-2021.	54
Tableau IV.8	liste des jours types par mois proposés par Klein	56
Tableau IV.9	Les coordonnées géographiques terrestres	56
Tableau IV.10.	Les valeurs de l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère.	57
Tableau IV.11.	Valeurs moyenne d'insolation mensuelle	58
Tableau IV.12.	Les valeurs de l'irradiation globale sur une surface horizontale.	59
Tableau IV.13.	Les valeurs de l'irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison égale à l'altitude	60
Tableau IV.14.	Les valeurs de l'irradiation globale journalière pour une inclinaison optimale.	61
Tableau IV.15.	Les résultats obtenus par le logiciel CROPWAT	63
Tableau IV.15.	Les besoins journaliers moyens en eau des palmiers/ hectare	64
Chapitre V		
Tableau V.1.	Les besoins journaliers moyens en eau d'été des palmiers / hectare	66
Tableau V.2.	Les valeurs de l'irradiation globale journalière d'été pour une inclinaison optimale	67

Tableau V.3.	Les caractéristiques techniques de la motopompe et de contrôleur	75
Tableau V.4.	Caractéristiques électriques du module PV (VICTRON 360Wc-24V)	76
Tableau V.5.	Le cout total de l'investissement et l'amortissement de système PV	89
Tableau V.6.	Calcul de l'investissement et de l'entretien total de système PV	90

Liste des symboles et abréviations

Symboles	Désignations	Unité
A	La surface active du générateur	m ²
A_{Total}	Amortissement total	DA
B _A	Besoin moyenne annuel	m ³ /ans
C_m	coût de 1m	DA
C_g	Le coût global du système photovoltaïque	DA
D	Le diamètre de l'écoulement	m
<i>eff</i>	L'efficacité d'irrigation	%
E_e	Energie électrique	KWh/j
E_h	Energie hydraulique	kWh/j
E _{Total}	Entretien total	DA
Evapo	Evaporation	mm
ET	Evapotranspiration	mm
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
ETR	Evapotranspiration réelle	mm
ET0	Evapotranspiration de référence	mm
F _m	Facteur de couplage	[-]
G	L'éclairement dans les conditions standards de mesure (CSM)	W/m ²
G _d	Irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules	Gd
HMT	La hauteur manométrique totale	m
H _b	La composante directe	Wh/m ² /j
H _d	La composition diffuse	Wh/m ² /j
H _g	Hauteur géométrique	m
H _r	Humidité relative de l'air	%
H _T	L'irradiation globale journalière moyenne mensuelle pour une inclinaison optimale	HT

<i>I</i>	Insolation	Heure
IB	Irrigation Brute	mm
IN	Besoin nette	mm
I_{mp}	Courant à P_{max}	A
$I_{max.cont}$	Intensité maximale du contrôleur	A
I_{sc}	Courant de court-circuit	A
K	Coefficient de perte de charge singulière	[-]
K_c	Le coefficient cultural	[-]
L	La longueur de l'écoulement	m
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature	°C
N_d	Niveau dynamique	m
N_h	Le nombre d'heure d'ensoleillement maximal	Heure
N_M	Nombre totale de modules	[-]
N_{MS}	Nombre de modules en série	[-]
N_{MP}	Nombre de modules en parallèle	[-]
N_s	Niveau statique	m
P	Précipitation	mm
P_{elec}	La puissance crête du générateur photovoltaïque	W
P_{max}	Puissance maximale	W
P_m	La puissance de module photovoltaïque	W
P_h	La puissance hydraulique	kWh/j
Q	Débit volumique	m ³ /s
Q_h	Débit horaire	m ³ /h
R_m	Rabattement	m
R_b	Facteur de conversion	[-]
T	Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement	°C
T_{min}	Moyennes des températures minimales mensuelles exprimées	°C

T_{max}	Moyennes des températures maximales mensuelles exprimées	°C
T_{moy}	La moyenne des températures mensuelles exprimées	°C
v	La vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
V	Volume d'eau	m ³ /j
V_{ch}	La tension exigée à l'entrée du convertisseur de puissance.	V_{ch}
V_m	La tension fournie par le module photovoltaïque au point de la puissance maximale	V_m
V_{mp}	Tension à P_{max}	V
V_{oc}	Tension circuit ouvert du générateur photovoltaïque	V
$V_{max.cont}$	Tension maximale du contrôleur	V
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	[°]
ΔH_T	Pertes de charge (linéaires et singulières)	mCE
λ	Le coefficient de pertes de charge régulières	λ
g	La gravité terrestre	m/s ²
ρ	La masse volumique d'eau	kg/m ³
η_{MP}	Le rendement du groupe motopompe	%
η_{ond}	Le rendement d'onduleur	%
η_g	Le rendement du générateur sous les conditions standards de mesure CSM	η_g
η_{pv}	Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation	%
ρ	L'albédo au sol	[-]
β	L'angle d'inclinaison	[°]
γ	Coefficient de température des cellules	°C

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre I : Etude bibliographique des techniques d'irrigation	
I.1.Introduction	04
I.2.L'irrigation dans le monde	04
I.3.L'irrigation dans l'Algérie	04
I.4.Système d'irrigation	05
I.5.Techniques d'irrigation	05
I.5.1.L'irrigation gravitaire	05
I.5.2. L'irrigation par aspersion.....	08
I.5.3.L'irrigation localisée (goutte à goutte).....	10
I.6.Conclusion.....	12
Chapitre II : Etude bibliographique du pompage photovoltaïque	
II.1 Introduction	14
II.2. L'énergie solaire	14
II.2.1. Les différentes technologies solaires	14
II.3. Rayonnement solaire.....	16
II.3.1. Différents types de rayonnement.....	17
II.4. Le système photovoltaïque.....	18
II.4.1. Les différents types de système photovoltaïque.....	18
II.4.1.1. Système autonome.....	18
II.4.1.2. Système raccordé au réseau.....	19
II.4.2. Les différentes composantes d'une installation photovoltaïques.....	20
II.4.2.1. Les panneaux solaires (générateur photovoltaïque)	20
II.4.3.Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque.....	26
II.5. Le pompage photovoltaïque.....	27
II.5.1. Différentes méthodes de système photovoltaïque.....	27
II.5.1.1. Système de pompage avec stockage d'électricité « batterie »... ..	27
II.5.1.2. Système de pompage au fil du soleil.....	28
II.6. Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	30
II.6.1. Installation photovoltaïque.....	30
II.6.2. Le groupe électropompe.....	30
II.7.Conclusion.....	36

Chapitre III : Méthodes et bases de calcul des systèmes de pompage et d'irrigation

III.1. Introduction.....	38
III.2. Notion hydraulique.....	38
III.2.1. Débit.....	38
III.2.2. Hauteur manométrique totale.....	38
III.2.3. Niveau statique N_s	39
III.2.4. Niveau dynamique N_d	39
III.2.5. Rabattement (Rm).....	39
III.2.6. Les pertes de charge.....	39
III.2.7. Les pertes de charge régulière.....	40
III.2.8. Les pertes de charge singulière.....	41
III.3. Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	41
III.3.1. Estimation des besoins en eau.....	42
III.3.2. L'énergie hydraulique quotidienne requise.....	43
III.3.3. L'énergie électrique quotidienne requise.....	43
III.3.4. L'énergie solaire disponible.....	43
III.3.5. Taille de générateur photovoltaïque.....	44
III.3.6. Choix des composants.....	47
III.4. Conclusion.....	48

Chapitre IV : Etude de cas

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Présentation de la zone d'étude.....	50
IV.2.1 Cadre géographique.....	50
IV.2.2 Cas d'application.....	51
IV.3 .les conditions climatiques.....	51
IV.3.1. La température.....	52
IV.3.2. L'humidité relative de l'air.....	52
IV.3.3. Précipitation.....	53
IV.3.4. Le vent.....	53
IV.3.5. L'insolation.....	53
IV.3.6 L'évaporation.....	54
IV.4. Les sols de la région et l'eau d'irrigation.....	54

IV.4.1. Ressource en eau souterraines.....	54
IV.4.2 Les caractéristiques techniques de la nappe de Hassi Ben Abdallah.....	55
IV.5. Rayonnement solaire.....	55
IV.5.1. Les coordonnées géographiques terrestres de Hassi Ben Abdallah.....	56
IV.5.2. L'indice de clarté.....	57
IV.5.3. Calcule de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale.....	57
IV.5.4. Calcule de l'irradiation globale journalière sur une surface inclinée.....	59
IV.6. Système d'irrigation.....	61
IV.7. Estimation des besoins en eau.....	62
IV.7.1. Evapotranspiration (ET).....	62
IV.7.2. Evapotranspiration potentielle (ETP) ou (ET ₀).....	62
IV.7.3. Besoin en eau d'irrigation (IB).....	63

Chapitre V : Dimensionnement de système de pompage photovoltaïque

V.Introduction.....	66
V.1.Système de pompage solaire.....	66
V.1.1. Estimation des besoins en eau.....	66
V.1.2 Rayonnement solaire.....	66
V.2.Dimensionnement de la station de pompage.....	67
V.2.1. Choix de la pompe.....	67
V.2.2.Model d'irrigation recommandée pour une parcelle d'un hectare de palmier dattier.....	68
V.2.3.Capacité de réservoir.....	73
V.2.4. Dimensionnement de la conduite.....	73
V.2.5. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....	76
V.2.6. Calcul de l'énergie électrique.....	76
V.2.7. La taille du générateur photovoltaïque.....	76
V.3 .Logiciel simulation d'un système de pompage solaire.....	78
V.3.1. Présentation de logiciel de simulation PVSYST.....	78
V.3.2. Etape de la simulation d'un système de pompage solaire par PV SYST 7.2..	79
V.4. Analyse économique des systèmes de pompage photovoltaïque.....	87
V.5 .Evaluation le cout globale actualisé du 1m ³ d'eau pompé.....	87

V.5.1. Calcul de l'investissement initial total.....	88
V.5.2. Calcul des coûts sur la durée de vie.....	88
V.6. L'énergie consommée par la pompe.....	91
V.6. Conclusion.....	92
Conclusion générale.....	93

Introduction générale

L'eau est une source inégalable de vie pour l'homme, les animaux ou les végétaux, c'est la ressource naturelle la plus consommée dans le monde entier, qu'elle soit salée ou douce. Cela n'empêche en rien, son utilisation perpétuelle, dans différents domaines, tel que l'agriculture et l'industrie. Au-delà de ces utilisations basiques, comme dans l'irrigation ou l'élevage, elle est aussi cruciale dans le domaine de la production énergétique.

68% de l'énergie mondiale est issue des énergies fossiles comme le pétrole, le gaz ou encore le charbon, mais ces dernières sont très précaires à cause de leurs nocivités pour notre environnement, comme les émanations toxiques que leur utilisation engendre, d'une part et leurs épuisement imminent.

Parmi, toutes les énergies renouvelables, le photovoltaïque est la plus propre, non onéreuse et pratique, puisqu'elle fournit directement de l'électricité. La souplesse, l'aisance de son installation et la facilité de son exploitation la rendent plus pratique. C'est l'énergie type pour être utilisée, dans les régions non raccordées aux réseaux de distribution nationale. Ceci est bon pour les pays du tiers-monde ou développés, puisque l'énergie électrique qu'on y produit sert à améliorer la qualité de vie de ces nations.

Dans ce corpus de fin d'études, pour l'obtention du diplôme de master, nous allons expliquer, les différentes étapes nécessaires pour le dimensionnement d'une station de pompage au fil du soleil alimenté par énergie solaire photovoltaïque. Nous allons aussi estimer le coût financier du projet et le comparer à celui de la même station alimentée par le réseau électrique national (Sonelgaz).

Cette station de pompage photovoltaïque, sera réalisée dans la commune de Hassi Ben Abdallah, wilaya d'Ouargla. C'est une zone du Sahara algérien enclavée, au climat aride et ensoleillé.

Ce travail sera réparti en cinq chapitres, résumés comme suit :

Dans le premier chapitre, on abordera le thème de l'irrigation, ses différentes techniques et les avantages et désavantages de chaque technique utilisée.

Alors que dans le second, on parlera de l'énergie solaire et son rayonnement. On traitera le cœur du sujet, qui est, le système de pompage photovoltaïque, aussi la

technologie photovoltaïque, son installation, les différentes pièces qui la compose, ses atouts et inconvénients.

Le troisième chapitre, traitera des méthodes de calculs utilisés pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque mais de manière théorique.

Dans le quatrième chapitre on présentera la zone d'étude, son climat, l'ensoleillement et la qualité du sol ladite région. On y abordera aussi le système d'irrigation choisi et l'estimation des besoins en eau pour les palmiers dattiers, plantés, pour un seul hectare.

Pour le cinquième et dernier chapitre, on présentera, les calculs réels de dimensionnement du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil et de l'irrigation goutte à goutte de la plantation de dattiers choisie. On présentera aussi, dans cette partie une étude technico économique, pour montrer que l'investissement dans système photovoltaïque, dans zones enclavées et loin du réseau Sonelgaz, est moins coûteux et plus avantageux.

CHAPITRE I :
Etude bibliographique des techniques d'irrigation

I.1.Introduction :

L'irrigation est l'apport artificiel de l'eau au sol pour alimenter les plantes et aussi pour rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen on réalise les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. Quel que soit l'origine de l'eau (cours d'eau naturel, nappe souterraine, eau de barrage...) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression).

Dans ce chapitre on fait l'étude bibliographique des techniques d'irrigation.

I.2.L'irrigation dans le monde :

L'irrigation concerne 18 % des terres cultivées et assure plus de 40 % de l'alimentation mondiale. Si la productivité à l'hectare de l'agriculture irriguée est plus élevée et plus régulière que celle de l'agriculture pluviale, l'irrigation est cependant plus contraignante à bien des égards. [1]

Et la consommation d'eau agricole est très variable d'un pays à l'autre. Elle n'intéresse que 273 millions d'hectares dans le monde éparpillé très irrégulièrement sur tous les continents contrairement à ce que l'on pourrait penser, les pays qui irriguent le plus ne sont pas les pays au climat aride ou semi-aride. Les pays qui irriguent le plus sont ceux situés dans le sud-ouest asiatique, lesquels rassemblent plus de 60 % des terres irriguées de la planète, et certains pays du pourtour méditerranéen [2].

I.3.L'irrigation dans l'Algérie :

L'utilisation de l'irrigation en Algérie est très ancienne, comme en témoignent les vestiges de l'époque romaine (bassins, aqueducs). Des techniques d'irrigation séculaires sont encore utilisées jusqu'à aujourd'hui. Ces différentes techniques (couvertures, carex, barrages, puits pendulaires...) sont adaptées à la grande diversité des régions de l'Algérie, et ce depuis la période coloniale [3].

Et en raison des réserves d'eau dans le sous-sol dans la nappe albiennaise, le désert du Sahara en Algérie, représente l'espoir et le futur de l'agriculture en Algérie. La superficie qui pourrait être dédiée à l'agriculture au Sud et aux Hauts plateaux algériens représente trois fois la superficie agricole existante. Cependant, l'environnement physique du développement agricole au Sahara est parsemé d'embûches : évaporation intense, sol pauvre et eau saumâtre. Dans un tel environnement l'agriculture est moins productive [4].

I.4. Système d'irrigation :

La lecture d'un système d'irrigation repose sur l'observation de l'organisation spatiale de ce système. Elle distingue deux facteurs déterminants : la structure physique du réseau et la répartition de l'eau. A partir de cette lecture et de son interprétation, il est alors possible de comprendre les éléments de l'organisation sociale du partage d'une ressource [5]. La figure I.1 représente les différentes techniques d'irrigation.

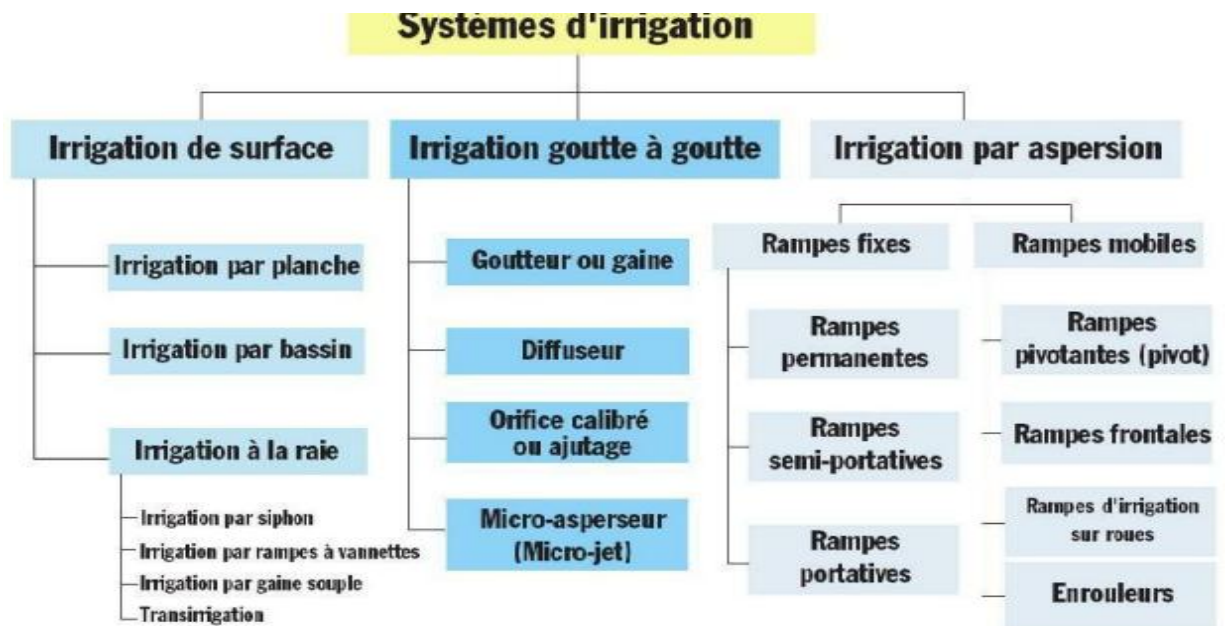


Figure I.1. les différents techniques d'irrigation [5]

I.5. Techniques d'irrigation :

I.5.1. L'irrigation gravitaire :

L'irrigation gravitaire consiste à amener l'eau au point le plus haut du terrain et à la laisser s'écouler par gravité.

I.5.1.1. L'irrigation par bassin :

Sa pratique sur un sol nivelé (pente 0,1 à 1%) ainsi que la simplicité de l'opération, qui consiste à remplir le bassin, fait que cette technique est fréquemment utilisée. La taille des bassins est de 40 à 50 mètre carré et cette technique est connue sous le nom "Robta". Cette dernière occasionne une perte importante de superficie, due au nombre important de cloisonnements [6].

La méthode par bassins est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers. Dans ce cas une petite cuvette (bassin) est aménagée autour de chaque arbre. En général, cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion

pour une longue durée (12-24 h). Elle n'est pas recommandée pour les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux pour des durées supérieures à 24 heures [7].

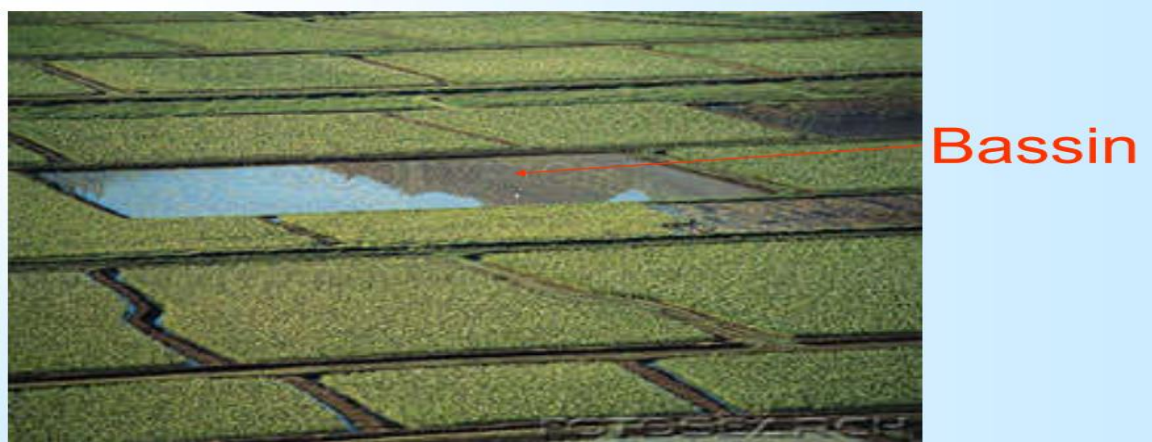


Figure I.2. Irrigation par bassins [7].

I.5.1.2.L'irrigation par planche :

L'irrigation par planches est l'apport d'eau sur des longues parcelles en pente et rectangulaire avec des conditions de drainage à l'extrémité basse du champ. Les planches sont disposées dans le sens de la plus grande pente, 30 à 65 pieds de large, 300 à 1300 pieds de long avec de petites levées de terre entre les bandes pour canaliser l'eau durant l'irrigation. Le terrain entre les planches doit être nivelé perpendiculairement à la direction de l'eau. L'irrigation par planche convient très bien pour la plupart des types de cultures et de sol mais elle est favorisée par les sols ayant une vitesse d'infiltration lente et les cultures qui tolèrent un plaquage prolongé. L'irrigation par bassin est principalement utilisée pour les cultures denses comme la luzerne, l'herbe et les céréales basses mais pas sur les cultures en ligne [8].

I.5.1.3.L'irrigation par rigole :

L'eau est acheminée par un réseau de canaux (des sillons séparés d'une distance de 0,6 m à 1,25 m) et répartie sur les parcelles sous l'effet des forces de gravité

occasionnées par la pente (pente de 0,2 à 3 %) des ouvrages et du sol [9].



Figure I.3. Irrigation par rigole[9].

I.5.1.4.L'irrigation par gaine souple :

Débit d'irrigation est véhiculé à l'intérieur d'une gaine souple déroulée devant les rangées de culture. La gaine est équipée de dérivations qui dirigent l'eau au sein de chaque raie à alimenter. Chacune de ces dérivations est constituée d'un tuyau souple de petit diamètre, de courte longueur, et sa section de sortie peut être plus ou moins obturée pour limiter le débit admis dans la raie [10].



Figure I.4. Irrigation par gaine souple [10].

I.5.1.5. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation gravitaire : [11]**a) Avantages :**

- Coût d'investissement est relativement faible parce que le besoin en énergie est faible ou nul.
- Possibilités d'utiliser les eaux salées et la bonne adaptation à l'épandage d'eaux usées.
- Les végétaux ne sont pas mouillés, ce qui est favorable sur le plan phytosanitaire.
- Technique éprouvée et insensibilité au vent.

b) Inconvénients :

- Inadaptation aux sols très filtrants et pertes d'eau dans les réseaux de canaux.
- Besoin important en main d'œuvre sauf dans le cas d'utilisation du matériel moderne.
- Surface consommée par les canaux et les bassins est très grande.

I.5.2. L'irrigation par aspersion :

Le but d'une irrigation par aspersion est l'application uniforme de l'eau sur l'aire occupée par la culture. Le système d'irrigation doit être conçu pour appliquer l'eau à un taux inférieur à la capacité d'infiltration du sol et éviter ainsi les pertes par ruissellement [12].

L'irrigation par aspersion convient aux cultures en lignes, de plein champ et à l'arboriculture. La distribution de l'eau peut se faire sur ou sous frondaison. Cependant, les asperseurs géants sont à éviter dans le cas des cultures délicates telles que la salade, car les grosses gouttes d'eau risquent de provoquer le dépérissement des plantes.

L'irrigation par aspersion s'adapte à toutes les pentes de terrain cultivable, qu'elles soient uniformes ou irrégulières. Les rampes d'arrosage portant les asperseurs doivent suivre autant que possible les courbes de niveau. Cette disposition a l'avantage de minimiser les variations de pression le long de la rampe et de garantir un arrosage uniforme. La technique d'irrigation par aspersion est la meilleure pour les sols sableux à taux d'infiltration assez fort, sans pour autant ignorer qu'elle s'adapte parfaitement à la plupart des types de sol. La pluviométrie moyenne des asperseurs (en mm/h) doit être inférieure au taux d'infiltration permanent du sol, pour éviter le ruissellement des eaux en surface. Cette technique est à écarter pour l'irrigation des cultures sur des sols à

encroûtement rapide. L'eau d'irrigation doit être propre, exempte de matières solides en suspension, pour éviter l'obstruction des buses et le dépôt des matières solides sur frondaison [10].



Figure I.5. Irrigation par aspersion [10].

I.5.2.1. Les avantages et les inconvénients du l'irrigation par aspersion:[13]

a) Avantages :

- Possibilités de réaliser des installations de protection contre les gelés radiatives.
- Avec les matériels entièrement automatiques, possibilité de réaliser des arrosages à faible dose et a cadence rapide.
- Possibilité d'arroser tous les types de sols et possibilités de réaliser des installations mobiles susceptible de déplacer suivant la nature des cultures, ce qui facilite les rotations culturales.

b) Inconvénients :

- Difficultés d'utilisation à efficience réduite en région ventées.
- Mauvaise adaptation aux sols et ne convient pas aux eaux salées sur beaucoup des cultures.
- Mouillage des feuilles favorisant les maladies cryptogamiques chez certaines espèces végétales.
- Cout très élevé à cause des dépenses énergétiques.

I.5.3.L'irrigation localisée (goutte à goutte) :

Cette méthode d'irrigation sous pression est appelée ainsi du fait que l'eau est appliquée en des endroits où l'on désire la voir s'infiltrer. Cette application est donc localisée. L'apport d'eau, à faible débit et à intervalles fréquents, est limité aux zones occupées par les racines des végétaux ; le système "goutte à goutte" est le plus utilisé. Les débits d'eau utilisés sont faibles, qu'ils soient continus ou répétés [14] .



Figure I.6. Irrigation localisée goutte à goutte [14] .

I.5.3.1. Les avantages et les inconvénients de l'irrigation localisée (goutte à goutte):[15]**a) Avantages :**

- Economisent fortement l'eau et réduisent les adventices.
- Permettent d'utiliser des eaux salées et sont insensibles aux vents.
- Autorisent une facilité de jaugeage de l'eau et permettent un raccourcissement du cycle végétatif de la culture.
- Mettent à la disposition des utilisateurs des conditions d'arrosage très souples et économisent la main d'œuvre.
- Se prêtent facilement à l'automatisation et s'adaptent bien à tous types de sols et de reliefs.
- Permettent d'arroser avec des débits très faibles avec contrôle précis de la dose et réduisent les coûts d'entretien.
- Gênent rarement les habitudes culturelles et sont constituées de structures souples, mobiles, adaptables à tous les cas particuliers et présentent des rendements excellents.

b) Inconvénients :

- Conviennent mieux à des cultures à forte valeur ajoutée et fonctionnent avec du matériel délicat à durée de vie relativement faible.
- Présentent un coût d'investissement élevé et exigent un haut niveau de compétence au moins pour les études.
- Nécessitent une maintenance rigoureuse et nécessitent la filtration de l'eau d'irrigation aussi.
- Connaissent une sensibilité des goutteurs à l'obstruction et ne conviennent pas à toutes les cultures.

I.5.3.2. Choix de la technique et du système d'irrigation :[16]

Les besoins en eau des cultures dépendent de nombreux facteurs agro-pédo-climatiques et sont les mêmes quelle que soit la technique d'irrigation utilisée. Néanmoins, les quantités d'eau à apporter pour satisfaire ces besoins varient avec le système d'irrigation envisagé. Par exemple, l'irrigation sous pression permet de faire les économies d'eau suivantes :

Pour des besoins identiques, des apports différents		
Irrigation traditionnelle	Irrigation sous pression	
Gravitaire	Aspersion	Goutte à Goutte
100 litres	70 litres	40 litres

I.6.Conclusion :

Dans ce chapitre une étude bibliographique sur les techniques d'irrigation à été faite. Premièrement la définition d'irrigation dont l'introduction et une présentation succincte des différentes techniques d'irrigation dans le monde et dans l'Algérie à été faite. Dans la deuxième partie de ce chapitre j'ai expliqué les techniques d'irrigation en général (l'irrigation gravitaire, l'irrigation par aspersion et l'irrigation localisé ou bien l'irrigation goutte à goutte), ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Ce chapitre montre l'importance du choix du système d'irrigation à utiliser (économisée de l'eau).

Chapitre II :

Etude bibliographique du pompage photovoltaïque

II.1 Introduction :

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation. Dans ce chapitre nous présenterons les notions sur l'énergie solaire, les différents types des systèmes photovoltaïques et les différentes méthodes de pompage solaire d'eau.

II.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable [17].

L'énergie solaire aussi c'est une source accessible à tous (industriels, collectivité et particulière). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergie : énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique [18].

II.2.1. Les différentes technologies solaires :

Il y'a trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire :

- La thermodynamique ;
- La thermique ;
- Le photovoltaïque ;

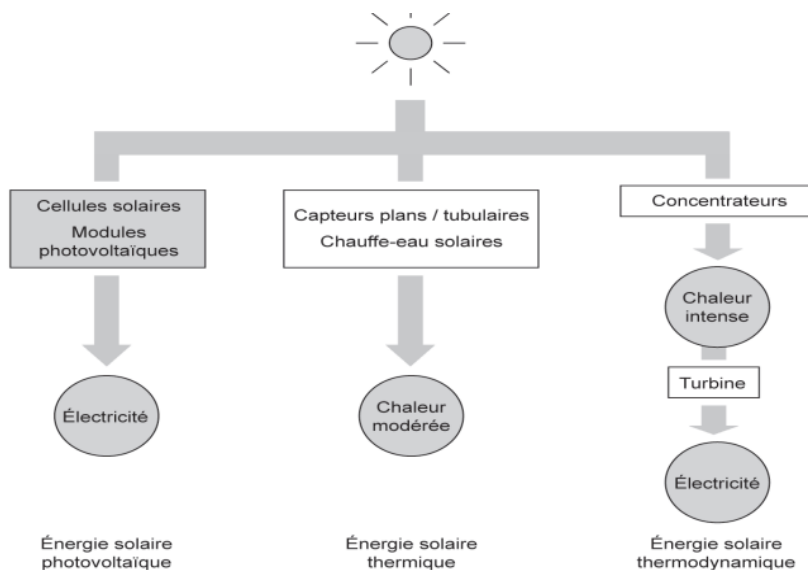


Figure II.1. Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire [19].

II.2.1.1. Solaire à concentration thermodynamique :

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur doit être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. La centrale ANDASOL 1 situé à Grenade, a ainsi une autonomie de 7 heures, mais des projets en cours ont comme objectif une autonomie de 20 heures.

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de la turbine, peut être utilisée pour l'arrosage [18].

II.2.1.2. Energie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner les turboalternateurs et ainsi pour obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que par le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques [19].

L'irradiation directe du soleil est concentrée par un collecteur sur un échangeur où elle est cédée à un fluide, soit vaporisé directement, soit en transportant la chaleur à un générateur de vapeur. Tous les systèmes ont en commun un certain nombre d'organe : un collecteur qui concentre la chaleur, un liquide ou un gaz caloporteur qui la transporte jusqu'à un point d'extraction, un évaporateur, un condenseur, une turbine et un alternateur [19].

II.2.1.3. Énergie solaires photovoltaïques :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [20]

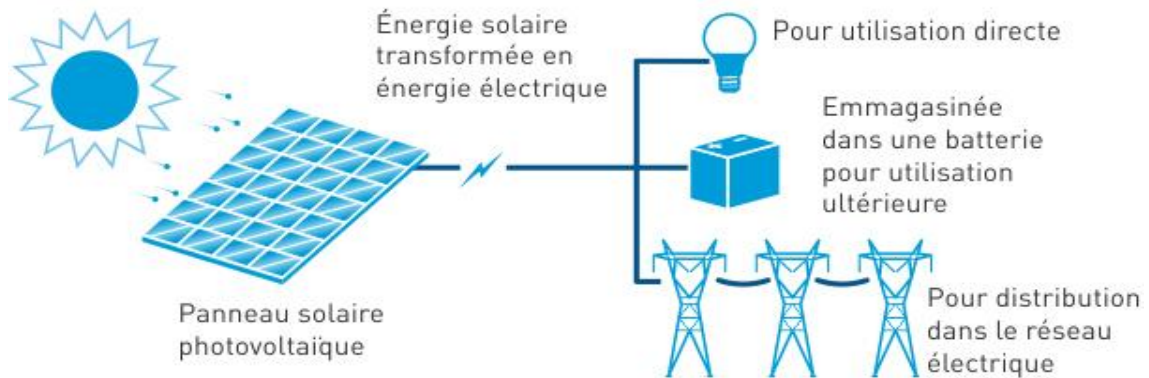


Figure II.2. Conversion de l'énergie solaire en électricité [20].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [20].

II.3. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0,2 et 4.10^{-6} m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui est absorbée. Une partie de rayonnement émis parvient jusqu'à la terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère et l'atmosphère (les ondes décimétriques et certains rayons ultraviolet).

Le rayonnement solaire global est composé du rayonnement direct, du rayonnement diffus et de l'albédo. L'évaluation des installations solaires nécessite des données irradiantes, c'est-à-dire du flux d'énergie incident sur une surface donnée par unité de temps et de surface, exprimé en W/m^2 , ou son intégration sur une durée déterminée, l'irradiation exprimée en kWh/m^2 [21].

II.3.1. Différents types de rayonnement :

II.3.1.1. Le rayonnement direct :

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [22].

II.3.1.2. Le rayonnement diffus :

Est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosol). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou violé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour de soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon [22].

II.3.1.3. Le rayonnement solaire réfléchi ou albédo :

Est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans incliné [22].

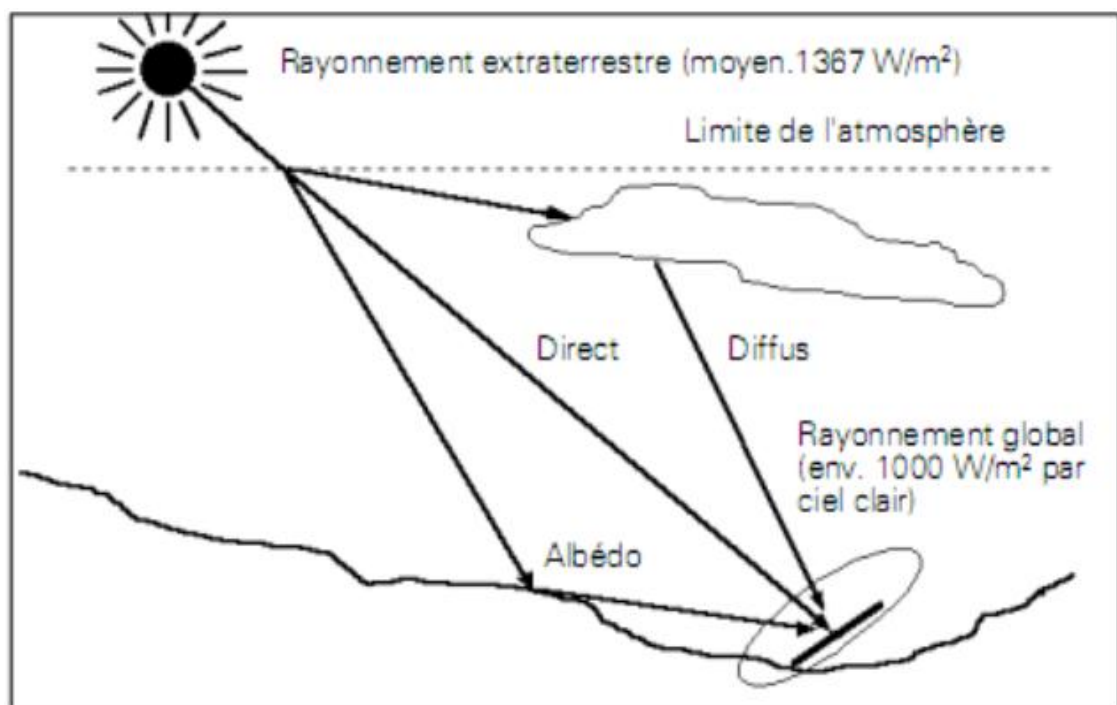


Figure II.3. Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct diffus +albédo [22].

II.4. Le système photovoltaïque :

II.4.1. Les différents types de système photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée :

- Système isolés et autonome
- Système raccordé au réseau

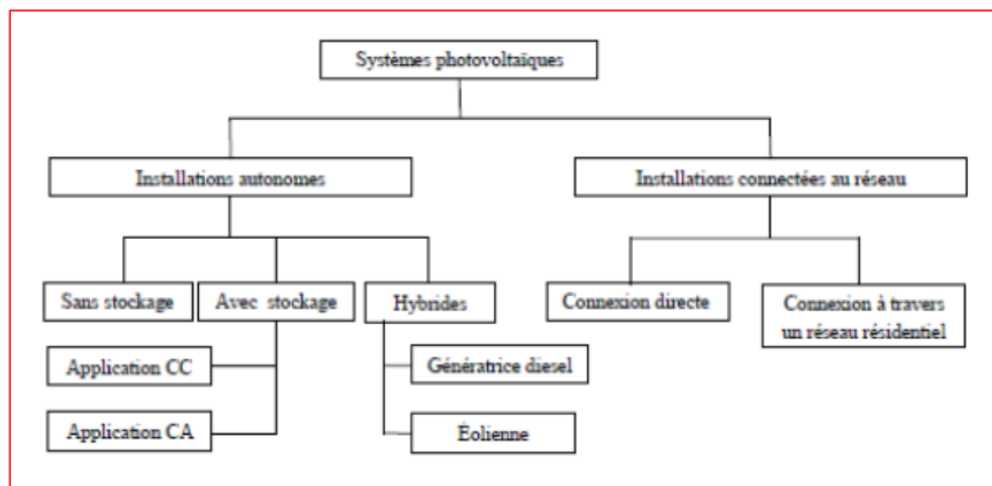


Figure II.4. Classifications des systèmes photovoltaïques [23].

II.4.1.1. Système autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique pour assurer un fonctionnement sans recours à d'autres sources d'énergie [24].

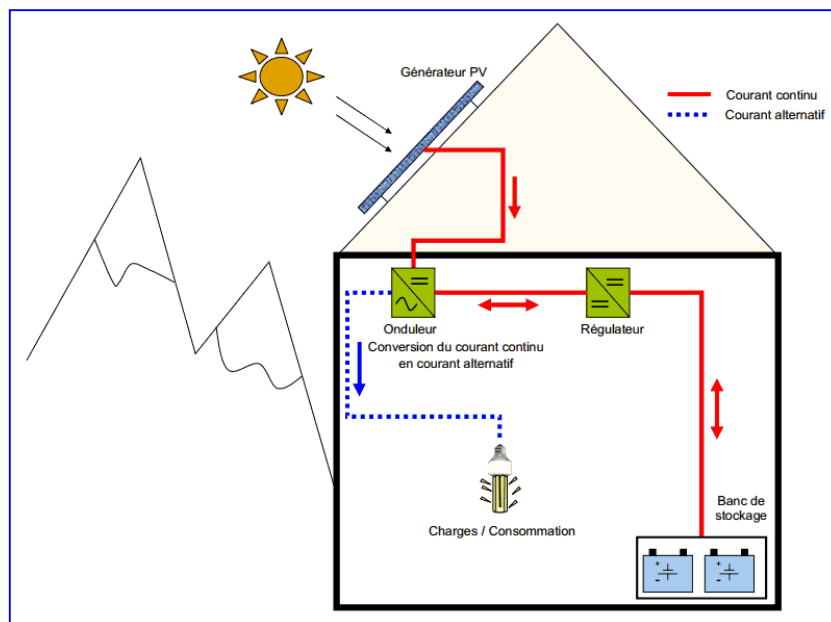


Figure II.5. Exemple de la structure d'un système PV autonome [24].

Les deux types de système photovoltaïques autonomes sont :

II.4.1.1.1. Système autonome avec stockage :

Système autonome avec stockage c'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe diverse composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques [24].

II.4.1.1.2. Système autonome sans stockage :

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de rayonnement solaire. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome ou le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [24].

II.4.1.2. Système raccordé au réseau :

Ce système permet de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans ce type de système les accumulateurs ne sont pas nécessaires parce que l'énergie est emmagasinée dans le réseau lui-même.

Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économique car le coût actuel de la technologie photovoltaïque est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle [24].

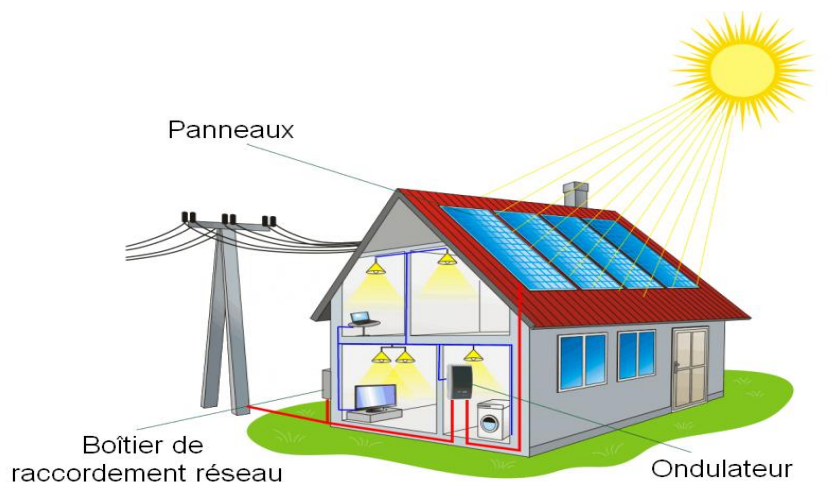


Figure II.6. Système photovoltaïque connecté au réseau [24].

II.4.2. Les différentes composantes d'une installation photovoltaïques :

Les différents composants d'une installation photovoltaïque sont [19] :

- Un générateur photovoltaïque ;
- Onduleur (pour les systèmes à courant alternatif) ;
- Câbles photovoltaïques ;
- Régulateur de charge ;
- La partie de stockage (batterie, réservoir) ;

II.4.2.1. Les panneaux solaires (générateur photovoltaïque) :**II.4.2.1.1. Définition :**

Le panneau solaire peut être constitué d'un ou plusieurs modules photovoltaïques appelé champ photovoltaïque destiné à produire de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire.

En effet, le champ photovoltaïque est une association en série et en parallèle de modules photovoltaïques selon la puissance et la tension d'utilisation. Chaque panneau solaire est lui-même constitué de cellules photovoltaïques et des modules photovoltaïques généralement montés en série [25].

❖ Association en parallèle, série et mixte :

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur, en associant ' N_p ' modules en parallèle.

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur, en associant ' N_s ' modules en série.

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [26].

II.4.2.1.2. Les cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium mono ou poly cristallin, amorphe, tellure de Cadmium(CdTe), et d'Arséniure de Gallium (GaAs) [25].

II.4.2.1.3. Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction 'pn' au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé 'n' on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge-).

Pour obtenir du silicium dopé 'p', on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction 'pn' est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique [27].

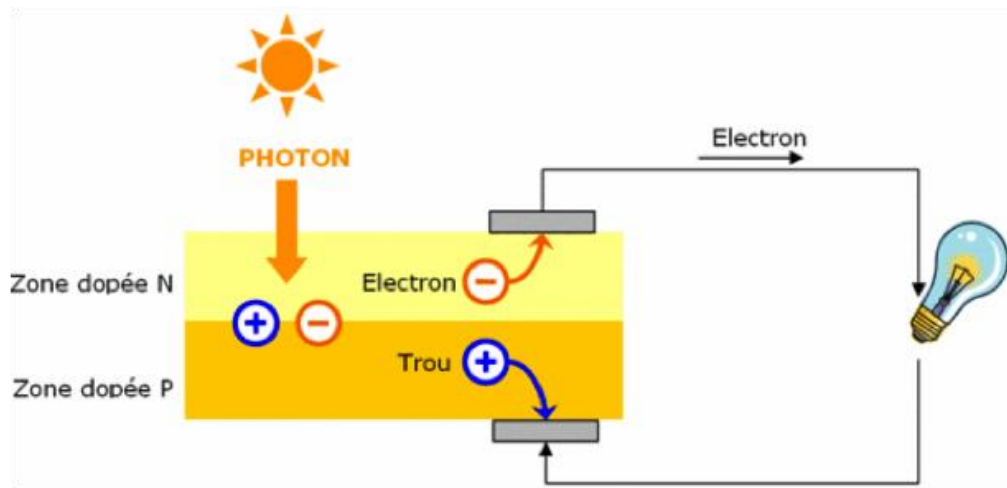


Figure II.7. Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [27].

II.4.2.1.4. Les caractéristiques des différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques [18]. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8% et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent [28].

Le tableau ci-après montre la comparaison entre les caractéristiques des différentes technologies :

Tableau II.1. Caractéristique des différentes technologies des cellules PV [25].

Matériaux	Rendement	caractéristique	utilisation
Silicium Monocristallin	12 à 18% (24,7 en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> • Très performant. • Stabilité de production d'énergie. • Méthode de production couteuse 	Modules pour toits, façades... Modules pour toits, façades...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle. • Stabilité de production d'énergie. • Moins cher que monocristallin. 	
Tellure de Cadmium (CdTe)	8 % (16 % en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> • Lourd, se fissure facilement 	<ul style="list-style-type: none"> • Système de concentrateurs aérospatiaux (Satellites)
Arséniure de Gallium (GaAs).	18 à 20 % (27.5% en laboratoire)		
Amorphe	5 à 8 % (13% en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement à faible luminosité, à ombrage partiel. • La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance est 15à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelque mois. 	Appareil électronique (Montres, Calculatrice)
Cellules Organiques	<5%	<ul style="list-style-type: none"> • Faible cout de fabrication flexible 	Domaine optique

II.4.2.1.5. Module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [22].

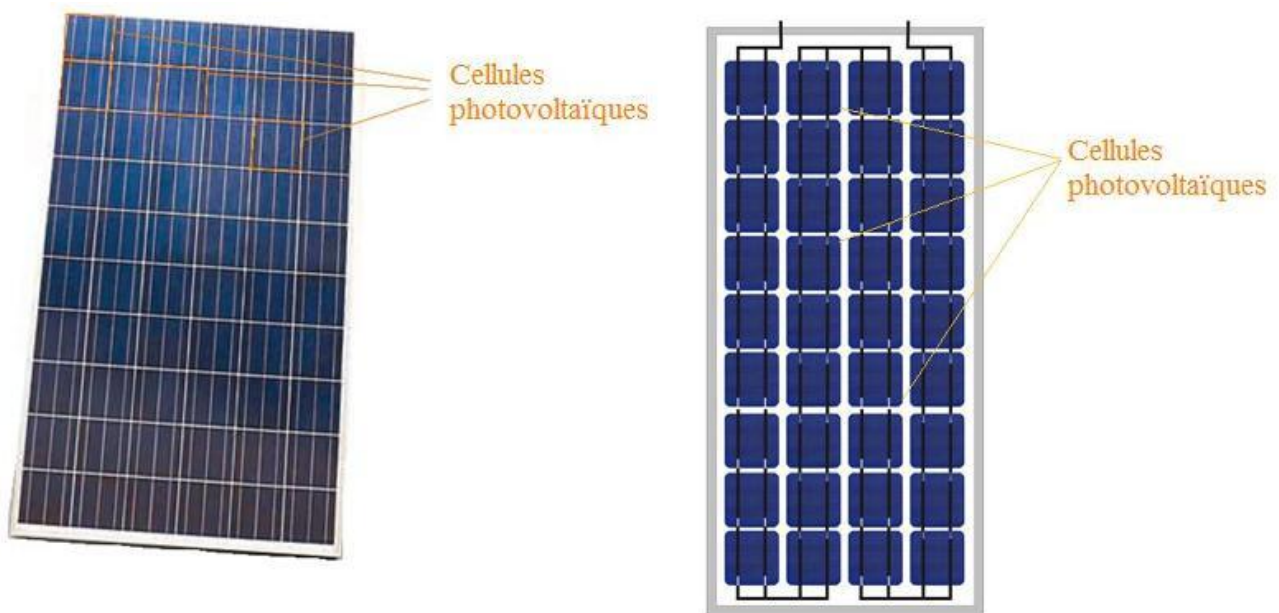


Figure II.8. Un module photovoltaïque [29]

II.4.2.1.5.1. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque [24] :

- **La puissance de crête p_c** : C'est la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standard : ensoleillement de 1000W/m^2 à l'horizontale, température ambiante 25C° .
- **La tension à circuit ouvert V_{oc}** : Tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairage 'plein de soleil'.
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : courant débité par le module en court-circuit pour un éclairage
- **Le point de fonctionnement optimum (U_{opt}, I_{opt})** : Point où la puissance est maximal, $P_m = U_{opt} \times I_{opt}$
- **Le rendement maximal** : Rapport entre la puissance électrique optimal à la puissance de radiation incidente.

II.4.2.2. Onduleurs photovoltaïques :

Un onduleur est un composant électronique qui permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau électrique.

Il calcule en permanence le point de fonctionnement (tension-courant) qui produit la puissance maximale à injecter au réseau [30].



Figure II.9. Principe de fonctionnement des onduleurs [31].

II.4.2.3. Régulateur (Contrôleur) [32] :

Afin d'éviter les surcharges et les décharges trop profondes des batteries, le régulateur solaire (aussi appelé régulateur de charge ou même contrôleur de charge) gère le niveau d'énergie stocké dans les batteries :

- Il limite la charge quand la batterie est complètement chargée.
- Il ralentit la décharge afin d'éviter les décharges profondes

Il y'a 2 éléments principaux à prendre en compte :

- La tension entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en général 12V, 24V ou 48V).
- L'intensité maximale du régulateur : l'intensité du régulateur (en ampères, A) doit être supérieure à l'intensité de court-circuit du ou des panneaux solaire auquel il est connecté.

Il existe deux sortes de régulateur :

PWM (Pulse-Width Modulation) :

Un régulateur solaire classique (PWM) ne transforme pas l'énergie produite par les panneaux : l'énergie non absorbée par les batteries est perdue

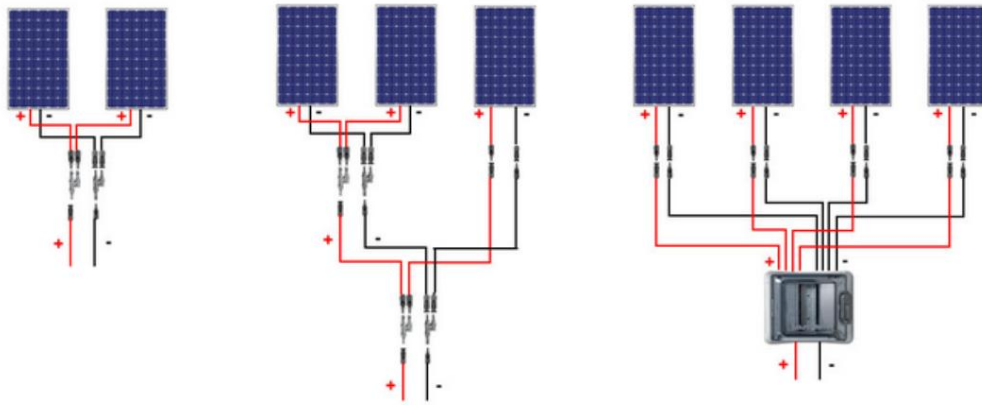


Figure II.10. Branchement en parallèle avec un régulateur PWM [32].

MPPT (Maximum Power Point)

Le régulateur MPPT fonctionne comme un convertisseur de puissance : la tension perdue au niveau des panneaux solaires est récupérée pour augmenter le courant de charge des batteries.

Ainsi, les régulateurs MPPT permettent le branchement en série des panneaux solaires (jusqu'à 150V) pour simplifier le câblage et diminuer le diamètre de câble nécessaire.

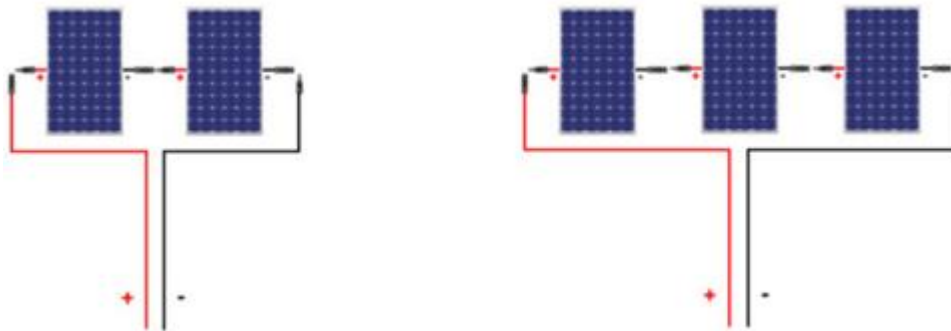


Figure II.11. Branchement en série avec un régulateur MPPT [32].

II.4.2.4. Câble Photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques doivent être reliés entre eux et le courant qui sort des modules doit être transporté vers les onduleurs. Pour ce faire, on utilise des câbles et des éléments de connexion.

Il existe deux types de câbles servant dans les systèmes photovoltaïques, les câbles DC (hacheur) sont les câbles permettant de transporter le courant continu entre les modules photovoltaïques et les onduleurs, les câbles AC sont les câbles permettant de transporter le courant alternatif entre les onduleurs et le réseau électrique [19].

II.4.2.5. Stockage de l'énergie solaire :

Les panneaux solaires ne sont que des convertisseurs d'énergie et non des réservoirs (Comme les piles). Ils transforment l'énergie mais ne la stockent pas. Si l'application demande de l'énergie en dehors des périodes de production, c'est-à-dire dans l'obscurité, il faudra nécessairement la récupérer dans un stockage (batterie, accumulateur) ou sur une autre source d'énergie.

Les applications possibles sans batterie fonctionnent soit en alimentation directe (en présence de lumière uniquement), soit grâce à un stockage hydraulique (pompage de l'eau), soit lorsque l'installation est connectée au réseau (objet de cet ouvrage).

Dans tous les autres cas, une batterie de stockage sera employée pour fournir de l'électricité dans l'obscurité et également lorsque le courant demandé est supérieur au courant fourni à cet instant par les panneaux [19].

II.4.3. Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque [33] :**II.4.3.1 Avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- Une haute fiabilité : elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent plutôt appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux permet un montage simple et adaptable aux divers besoins énergétiques pour des puissances allant du milliwatt au Kilo Watt.
- Le fonctionnement ne demande ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé, ce qui rend le coût de fonctionnement très faible.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique

II.4.3.2. Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements très coûteux.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)
- Lorsque le stockage de l'énergie électronique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur photovoltaïque augmente.

II.5. Le pompage photovoltaïque :

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les régions éloignées du réseau électrique domestique, désertiques ou montagneuses qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire, donc Il constitue une solution parfaitement adéquate pour subvenir aux besoins de l'irrigation.

La différence entre un système de pompage solaire et un système de pompage classique est l'alimentation électrique autonome. On doit donc utiliser des panneaux photovoltaïques, un convertisseur et une pompe adéquate. 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 [34].

II.5.1. Différentes méthodes de système photovoltaïque [34] :

Il se présente fondamentalement de deux façons :

II.5.1.1. Système de pompage avec stockage d'électricité « batteries » :

Ce système utilise des batteries qui stockent l'énergie électrique produite par les cellules. Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement ou nécessite une intensité régulière, pour remédier à ces limitations, des batteries est ajoutée au système.

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le stockage d'énergie électrique rend les systèmes de pompage photovoltaïque fiables, la journée et la nuit, en beau et mauvais temps.

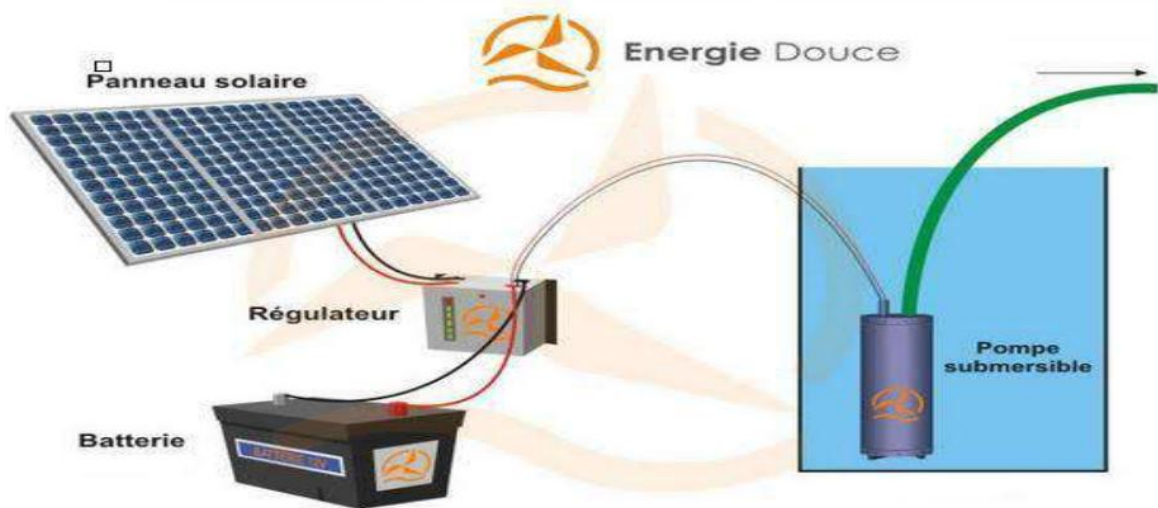


Figure II.12. Principe de fonctionnement du pompage avec stockage électrochimique [34].

II.5.1.2. Système de pompage au fil du soleil :

Le pompage au fil du soleil pompe l'eau quand il y'a le soleil et la stocke dans un réservoir jusqu'au moment de son utilisation, il est constitué d'un générateur photovoltaïque alimentant une pompe assistée par un régulateur contrôleur. Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plus part des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au 'fil du soleil' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie. La puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'éclairement.

Ce système est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles. Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour.

- Le pompage au fil du soleil est suffisant, la pompe est mise en route.
- La nuit ou quand le rayonnement devient trop faible, la pompe s'arrête.

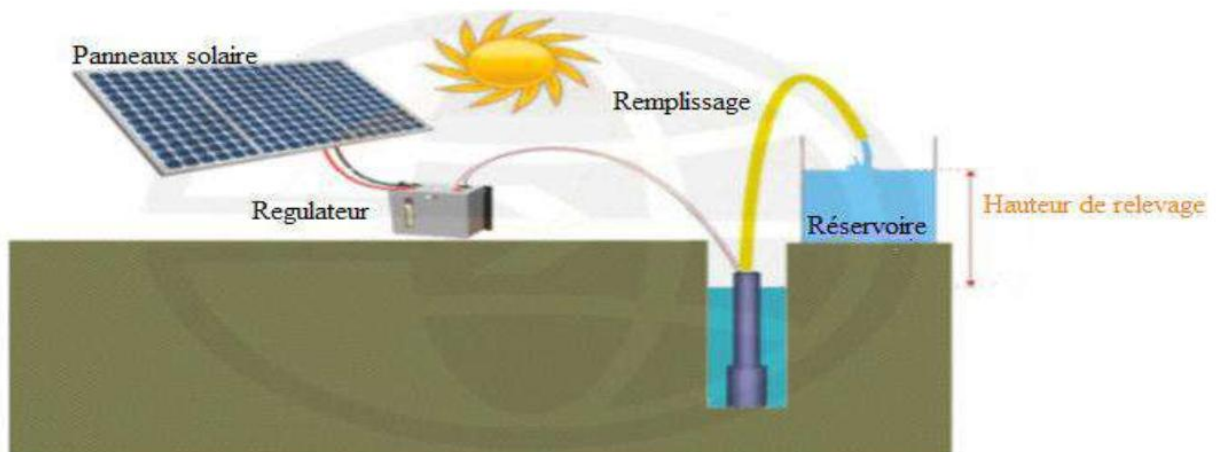


Figure II.13. Pompage au fil du soleil [34].

II.5.1.3. Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries :

Tableau II.2. Les avantages et les inconvénients des pompes au fils du soleil et avec batteries [34].

METHODE DE POMPAGE	Avantage	Inconvénients
Pompage au fil du soleil	<ul style="list-style-type: none"> • Economie du cout des batteries et par conséquence leur maintenance. • Système photovoltaïque plus simple plus fiable et moins couteux. • Meilleur rendement énergétique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perte d'énergie au début et à la fin de la journée. • Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut être trop élevé durant certaines périodes de la journée
Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> • Débit de la pompe régulier et à pression fixe. • Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cout élevé d'entretien et maintenance des batteries • Changement de batterie tous 5 à 7 ans. • Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie.

II.6. Les différents composants du système de pompage photovoltaïque :

Un système de pompage solaire est généralement constitué de :

- Une installation photovoltaïque ;
- Un groupe électropompe ;

II.6.1. Installation photovoltaïque :

Comme nous avons vu sur l'étude de l'installation photovoltaïque, qui est l'élément le plus important dans le système de pompage solaire.

II.6.2. Le groupe électropompe :

Le groupe électropompe est constitué d'un moteur électrique et la pompe

II.6.2.1. La pompe :

La pompe est l'appareil qui permet de transporter un fluide d'une source plus basse vers un point haut, quelle que soit la pompe, elle est constituée de trois parties distinctes.

- La partie motrice, qui fournit la puissance nécessaire au pompage.
- La transmission, qui transmet cette puissance à la partie hydraulique.
- La partie hydraulique, qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et/ou la refouler) [35].

On peut faire la classification des pompes solaire selon des différents critères : La conception de la pompe, la position dans le système et le type de moteur.

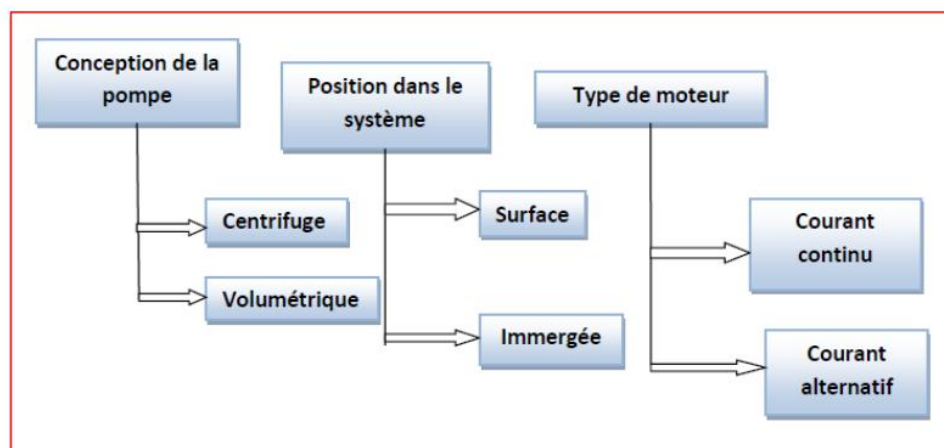


Figure II.14. Classification des pompes [36].

II.6.2.1.1. Classification selon la conception de la pompe solaire [35] :

Les pompes à eau solaires sont des pompes fonctionnant grâce à un moteur électrique dont l'énergie provient des cellules photovoltaïques disposés sur des panneaux solaires et captant l'énergie lumineuse du soleil.

Il existe deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques.

a). Pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont productrices de courant hydraulique. Dans les pompes centrifuges, l'énergie mécanique est tout d'abord transformée en énergie cinétique. Le fluide est aspiré axialement, sous l'effet de la rotation de l'impulsion, dans le corps de la pompe où il est accéléré radialement dans l'aube avant d'être refoulé. L'arbre est mis en mouvement grâce à un moteur électrique. La figure représente les éléments essentiels de la pompe centrifuge.

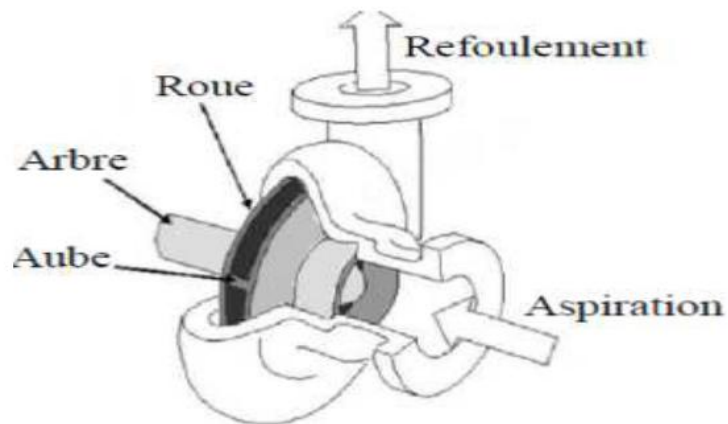


Figure II.15. La pompe centrifuge.

On trouve des différents types de pompes centrifuges :

- Les pompes centrifuges multicellulaires ou multiétages avec :
 - Des rotors fermés ou rotors ouverts.
 - On peut monter plusieurs roues sur le même arbre ce qui permet d'augmenter la pression de refoulement.
- La pompe centrifuge monocellulaire à roue en porte à faux est la plus simple.

b) Pompe volumétrique :

Le déplacement du fluide est dû aux transports d'un volume V_0 à chaque rotation. Les pompes volumétriques ou à capacité variable sont des pompes dans lesquels l'écoulement du fluide résulte de la variation d'une capacité occupée par le fluide.

Une pompe volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse.

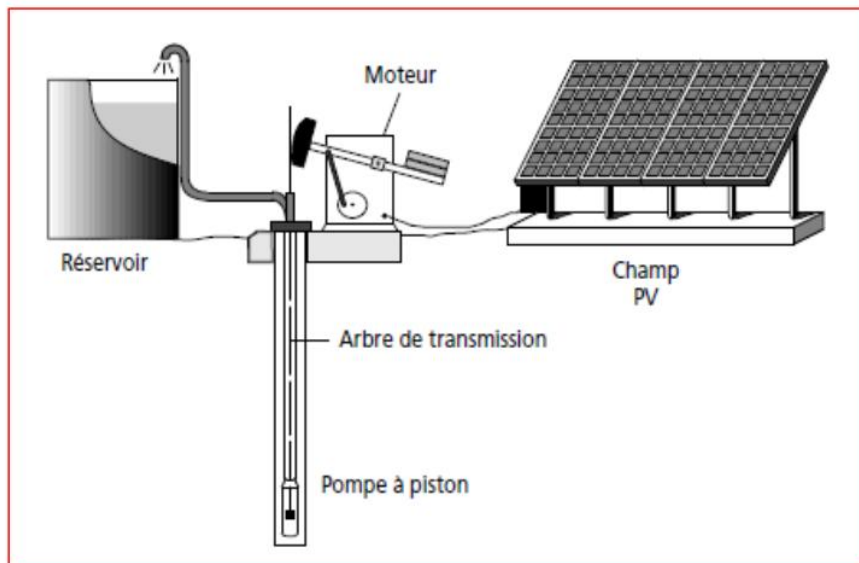


Figure II.16. Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits.

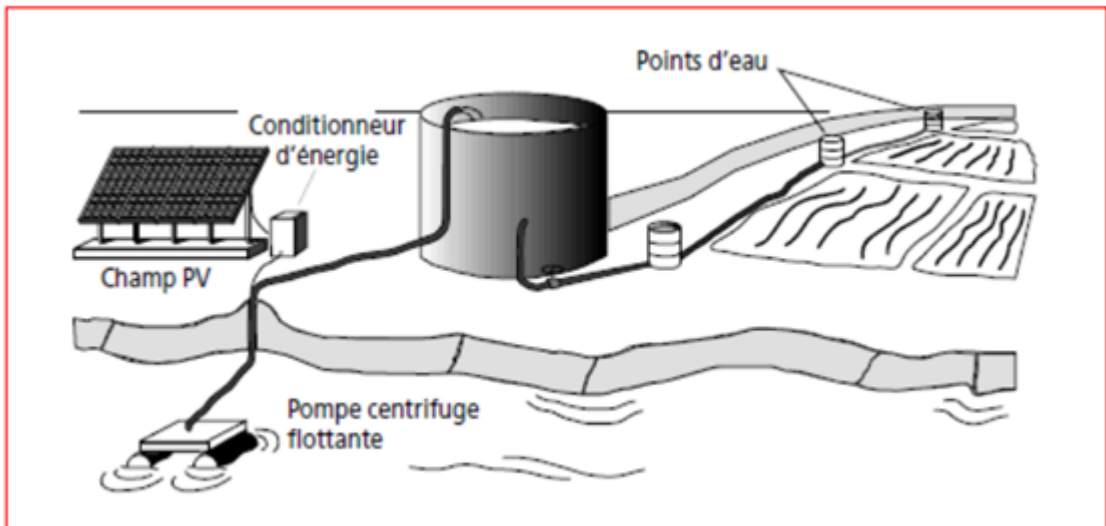
On distingue deux types : les pompes oscillantes et les pompes rotatives

Tableau II.3. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [37].

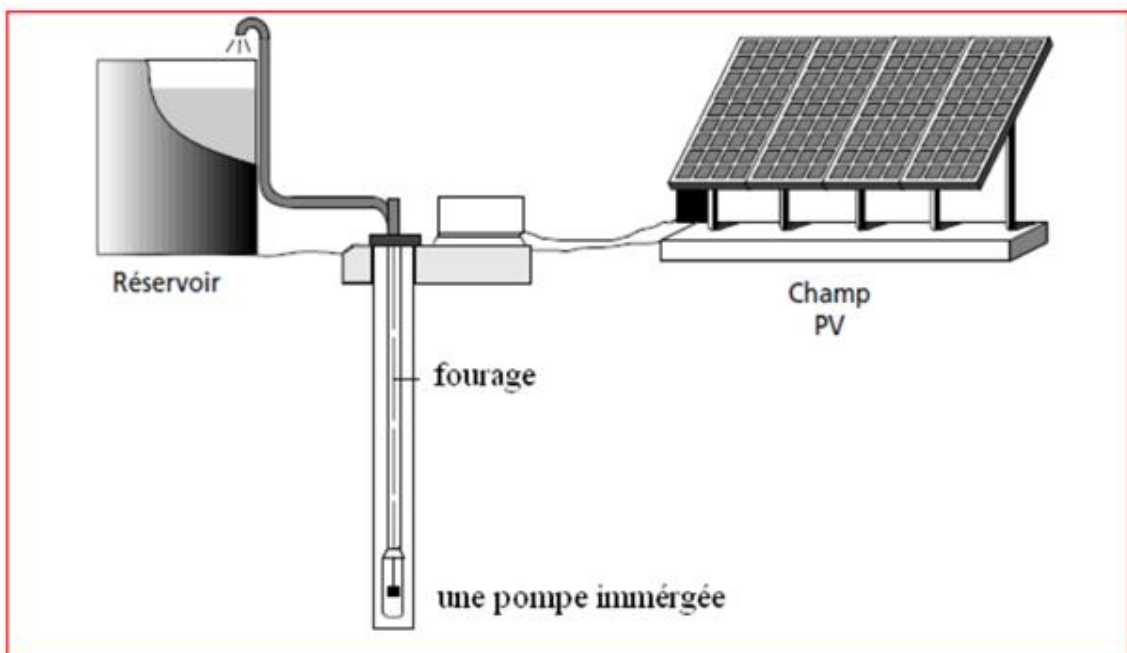
Les pompes centrifuges	Les pompes volumétriques
<ul style="list-style-type: none"> • Grand débit. • Ils sont très utilisés pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. • La pompe tourne par de très faible ensoleillement, le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible débit et une grand Hauteur manométrique. • Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à H_{MT} (3 à 5 fois le couple nominal). • 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 $5[m^3/h]$

II.6.2.1.2. Classification selon la position de la pompe solaire [35] :

- a) **La pompe de surface :** Pompe de surface est une pompe utilisée pour pomper l'eau de surface ou pour pomper l'eau de réservoir plus bas vers le réseau ou autre réservoir haut d'une technologie d'aspiration-refoulant à un niveau d'eau le plus bas située à moins de 7 mètres [35].

**Figure II.17.** Pompe de surface [38].

- b) **La pompe immergée :** La pompe immergée est une pompe qui est installée dans l'eau de forage à un débit qui dépasse à $2 \text{ m}^3/\text{h}$ et à niveau d'eau le plus bas situé à plus de 7 mètre [35].

**Figure II.18.** Pompe immergée [36].

II.6.2.2. Le moteur :

Le moteur électrique d'une électropompe, permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

Il y a trois types de moteur actuellement utilisés pour des applications de pompage photovoltaïques.

- Moteur à courant continue avec balais
- Moteur à courant continu, sans balais
- Moteur à courant alternatif

a) Moteur à courant continue avec balais :

Les moteurs à courant continu utilisés pour les applications de pompage solaire sont les moteurs en série, il faut avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable. Le couplage est direct ou avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu qui demande un entretien régulier. Les balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur [37].

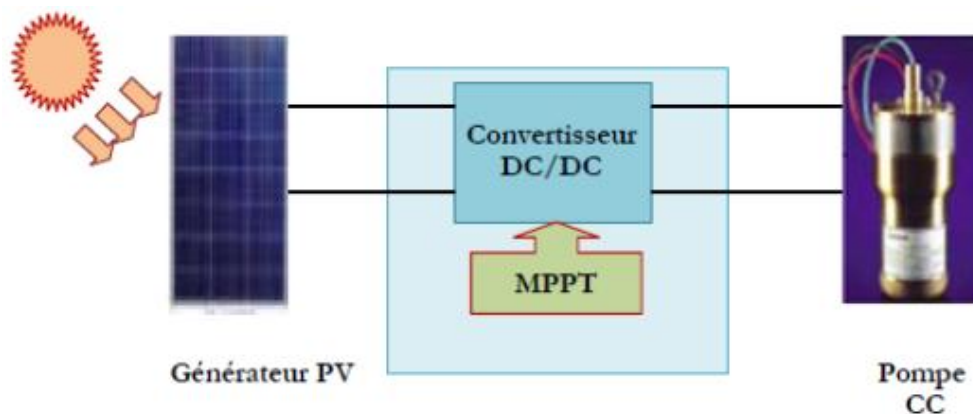


Figure II.19. Diagramme du pompage PV par motopompe à CC [37].

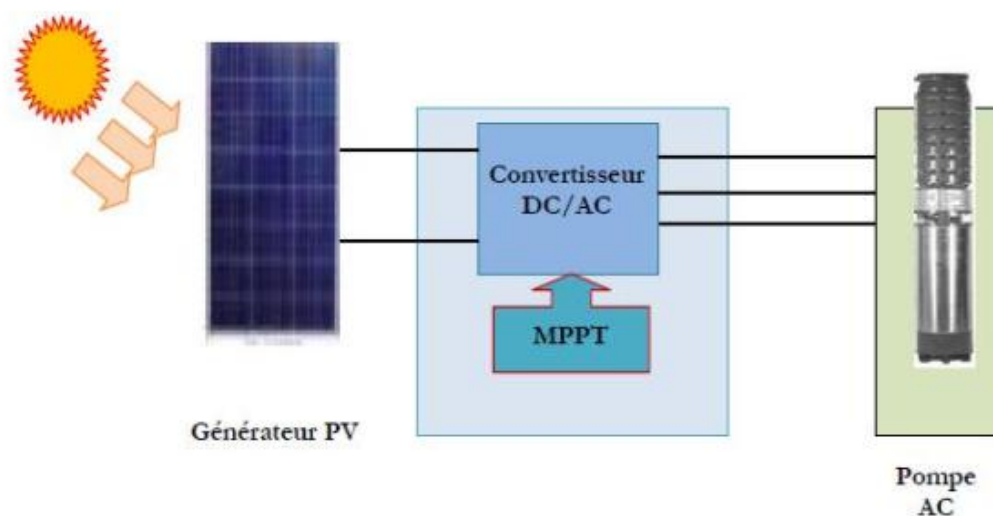
b) Moteur à courant continue sans balais :

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 [37].

c) Moteur à courant alternatif :

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi 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 photovoltaïque [37].



FigureII.20. Diagramme du pompage PV par motopompe à AC [37].

II.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les fondements de bases de l'énergie solaire photovoltaïque en passant en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principaux applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage photovoltaïque.

L'intérêt de cette étude a été axé sur les systèmes de pompage où nous avons passé en revue les configurations adoptées pour comprendre leurs fonctionnements dans un système de pompage photovoltaïque et particulièrement au fil du soleil.

Chapitre III :
**Méthodes et bases de calcul des systèmes de pompage
et d'irrigation**

III.1. Introduction :

La sélection correcte de l'équipement des installations photovoltaïques de pompage d'eau nécessite ce que l'on appelle le dimensionnement. À cette fin, nous consacrons ce chapitre aux calculs nécessaires et aux étapes à suivre afin d'identifier le matériau le plus adapté à notre étude.

III.2. Notion hydraulique :

La station de pompage se compose d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les repousser dans les tuyaux de réseau sous une certaine pression ; les paramètres nécessaires au dimensionnement d'une pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur que la pompe doit fournir. Cela augmente en fonction des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite [39].

III.2.1. Débit : Le débit est la quantité d'eau que la pompe peut refouler sur une période de temps donné. Il est exprimé en m^3/j , L/h ou L/min. En pompage solaire, le débit est généralement exprimé en m^3/j [40].

III.2.2. Hauteur manométrique totale : La hauteur manométrique totale (**HMT**) d'une pompe est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement [40].

La hauteur manométrique totale dépend de la hauteur géométrique d'élévation et des pertes de charge. Les pertes de charge dites de frottement dépendent du diamètre, de la longueur, de la rugosité, de la conduite et de débit, lors que les pertes de charges singulières sont dues à la présence « d'accident » sur la canalisation telle que vannes, coudes, clapets anti-retour, filtres, débitmètre, etc. [41].

Cette hauteur peut être calculée comme suit [33] :

$$HMT = H_g + \Delta H_T \quad (III.1)$$

Où

HMT: Hauteur géométrique totale (m).

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (**H_r + N_d**) [33].

ΔH_T : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont fonction de la longueur des conduites (L), de leur diamètre (d_c) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre d'eau. Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à **10%** de la hauteur géométrique totale [33].

III.2.3. Niveau statique N_s : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [40].

III.2.4. Niveau dynamique N_d : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à 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 [40].

III.2.5. Rabattement (R_m) : C'est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique [41].

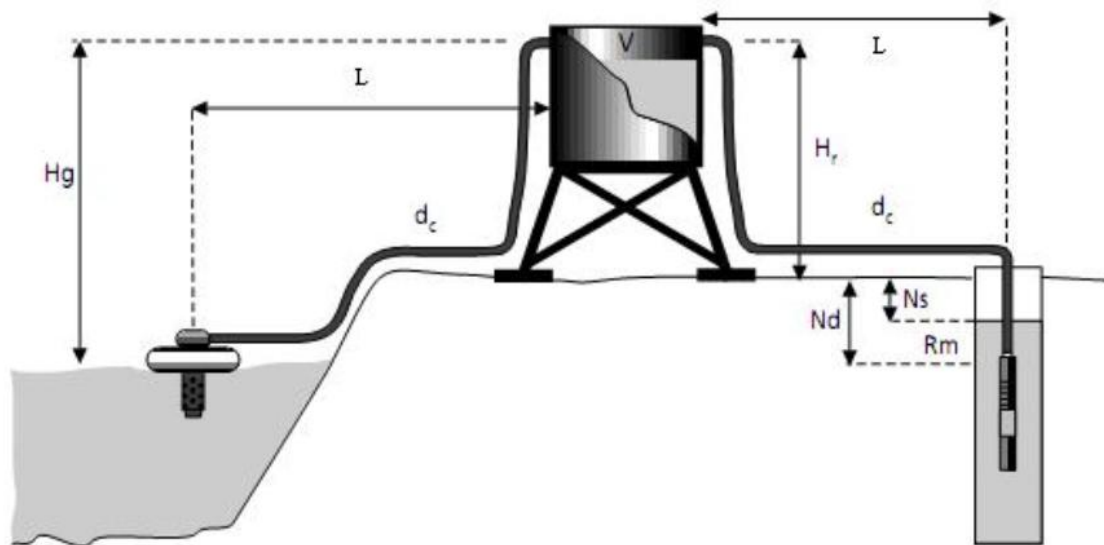


Figure III.1. Données de base d'une pompe [33].

III.2.6. Les pertes de charge : Les pertes de charge sont dues au frottement de l'eau contre les parois plus ou moins lisses de la tuyauterie, aux changements de diamètre, aux courbes et aux accessoires tels que vannes, couds, etc [33].

L'équation de Bernoulli s'écrit [33] :

$$(P_1 - P_2) + \rho g (z_1 - z_2) + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) = \Delta H_{1-2} = \Delta H_T \quad \text{(III.2)}$$

Avec :

P_1 : Pression à l'entrée de la pompe.

P_2 : Pression à la sortie

Les pertes de charge dans une conduite sont proportionnelles à sa longueur et dépend de la nature et l'état de sa paroi et de la vitesse d'écoulement (environ proportionnel au carré de cette vitesse) et inversement proportionnel au diamètre de la conduite.

III.2.7. Les pertes de charge régulières : Les pertes de charges régulières (ou systématiques) représentent les pertes d'énergies dues aux frottements du fluide dans une conduite de section constante. Elles sont exprimées en hauteurs de fluide (en mètres) et en pascals [42].

Cette équation peut obtenues par **l'équation de Darcy** [42] :

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{2D} \frac{v^2}{g} \quad \text{(III.3)}$$

Avec :

ΔH est la perte de charge en mètre colonne fluide (mce).

v est la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

D est le diamètre de l'écoulement (m).

L est la longueur de l'écoulement (m).

λ Est le coefficient de pertes de charge régulières (sans unité).

- **Écoulement laminaire ($Re < 2000$) [33] :**

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{(Loi de Poiseuille)}$$

- **Écoulement turbulent modéré ($2000 < Re < 10^5$) [33] :**

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25} \quad \text{(Loi de Blasius)}$$

- **Écoulement turbulent rugueux ($Re > 10^5$) [33] :**

$$\lambda = 0,79 \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \quad \text{(Loi de Blench)}$$

III.2.8. Les pertes de charge singulière : Les pertes de charge singulière (ou accidentelles) des réseaux aérauliques ou hydrauliques sont des pertes de pression provoquées par le passage du fluide dans les obstacle et accessoire comme des vannes, raccords, élargissement, sortie de réservoir, hotte aspirante, etc.

Les pertes de charge singulière s'expriment en pascals ou en mètre colonnes de fluide (m) ou en mètre de conduite rectiligne équivalentes [42].

Les pertes de charge singulières s'expriment par [43] :

$$\Delta H_s = K \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

ΔH_s : Pertes de charge singulière en Pa.

ρ : Masse volumique de fluide en Kg/m³.

v : Vitesse d'écoulement en m/s

K : Coefficient de perte de charge singulière (sans dimensions).

III.3. Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque :

Un système de pompage d'eau est composé de divers organes de fonctionnement. Le dimensionnement de l'ensemble du système de pompage se fait en fonction des besoins en eau [44].

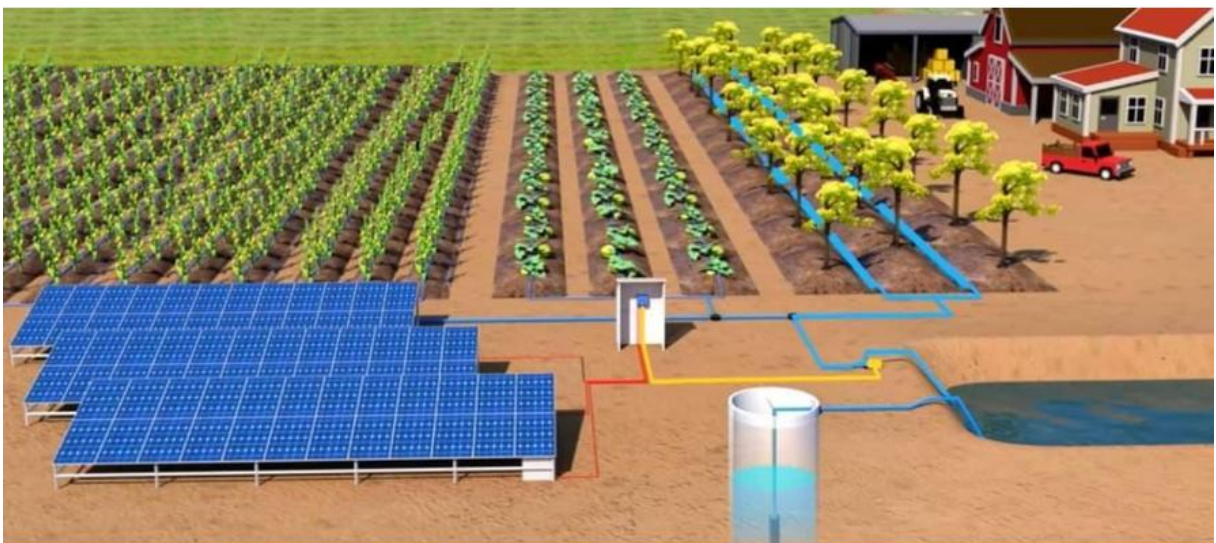


Figure III.2. Pompage d'eau par la technique d'irrigation « goutte à goutte » [24].

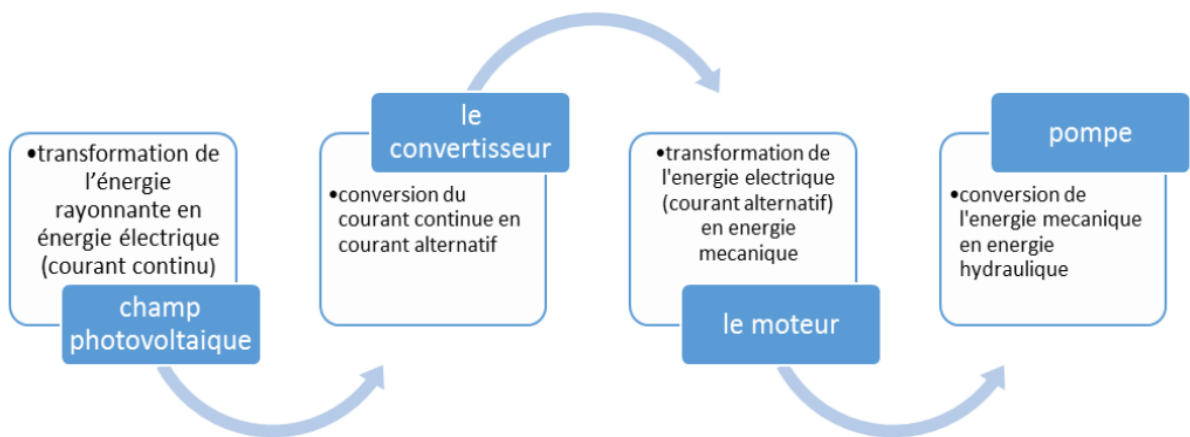


Figure III.3. Chaîne de conversion d'un pompage photovoltaïque au fil du soleil [24].

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

- Evaluation des besoins en eau,
- L'énergie hydraulique nécessaire,
- L'énergie électrique quotidienne requise,
- L'énergie solaire disponible,
- Choix des composants,

III.3.1. Estimation des besoins en eau :

L'une des étapes initiales les plus importantes dans l'installation d'un système de pompage d'eau par énergie solaire est de déterminer les besoins en eau, cette étape doit pouvoir déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et le type de pompe à eau sélectionné. La nécessité d'évaluer les besoins d'eau et les conditions d'exploitation à besoin des données expérimentales qui ne sont pas facile à obtenir.

La détermination des besoins en eau d'une population rurale dépend essentiellement de son mode de vie. On estime les besoins en eau nécessaire pour les zones rurales des pays pauvre à 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail [27].

Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent de plusieurs paramètres : le type de culture, les facteurs météorologiques comme l'ensoleillement, la température, l'humidité, la vitesse de vent, l'évaporation, la saison de l'année considérée et la technique d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale [44].

III.3.2. L'énergie hydraulique quotidienne requise :

Une fois les besoins en eau nécessaire pour chaque mois de l'année et les caractéristiques de puits déterminées, on peut calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle. Elle donnée par la formule suivante [39] :

$$E_h = \rho \times g \times V \times \frac{HMT}{3600} \quad (III.5)$$

Avec :

E_h : Energie hydraulique (KWH/j).

ρ : Masse volumique de fluide en (Kg/m³).

g : La gravité terrestre (9.81 m/s²).

V : Volume d'eau (m³/j).

HMT : Hauteur manométrie totale (m).

III.3.3. L'énergie électrique quotidienne requise :

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée. L'énergie électrique peut être déduite de l'énergie hydraulique par la formule [39] :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{ond}} \quad (III.6)$$

Avec :

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

η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe.

η_{ond} : Le rendement d'onduleur.

III.3.4. 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 par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit être réalisé de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en électricité [39].

III.3.5. Taille de générateur photovoltaïque :

La puissance de générateur photovoltaïque peut être calculée de deux manières :

III.3.5.1. Méthode analytique :

Il faut dimensionner le générateur photovoltaïque c'est-à-dire déterminer le nombre de module qui le composent pour alimenter le moteur d'entraînement, cette méthode consiste à calculer la puissance crête requise pour un bon fonctionnement de l'installation.

Cette puissance est nécessaire dans des conditions de mesure **CSM** standard (éclairage $G= 1000\text{W}/\text{m}^2$ et température de cellule $T= 25^\circ\text{C}$) pour produire une certaine quantité d'eau à une certaine hauteur manométrique par un groupe motopompe d'un rendement donné à un rayonnement solaire minimum donné. Elle est calculée comme suit [44] :

$$P_{\text{elec}} = \eta_g \cdot A \cdot G \quad (\text{III.7})$$

Avec :

P_{elec} : La puissance sortie de générateur (W) sous les conditions standards de mesure (puissance crête).

η_g : Le rendement de générateur sous les conditions standards de mesure CSM.

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

G : L'éclairement dans les conditions standards de mesure CSM.

L'énergie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque est calculé selon la formule suivante :

$$E_e = \eta_{\text{PV}} \cdot A \cdot G_d \quad (\text{III.8})$$

Avec :

η_{PV} : Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation.

G_d : Irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{j}$).

η_{PV} : Le rendement peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma(T - T_{ref})] \quad (III.9)$$

F_m : Facteur de couplage, définie 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.

γ : Coefficient de température de cellule.

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

La puissance crête que doit fournir le générateur photovoltaïque est résumée à la formule suivante :

$$P_{elec} = \frac{G}{F_m \cdot G_d [1 - \gamma(T - T_{ref})]} \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{ond}} \quad (III.10)$$

III.3.5.1.1. Nombre de module nécessaire :

Après avoir calculé la puissance crête requise, on détermine le nombre total des modules N_m constituant le générateur photovoltaïque par la formule suivante [44] :

$$N_M = \frac{P_{elec}}{P_m} \quad (III.11)$$

Avec :

N_M : Nombre totale des modules

P_{elec} : La puissance crête de générateur en (W).

P_m : La puissance de module photovoltaïque en (W).

III.3.5.1.2. Nombre de module en série :

Le nombre des modules en série est calculé par l'expression suivante [44] :

$$N_{ms} = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (III.12)$$

Avec :

N_{ms} : Nombre des modules en série.

V_{ch} : La tension exigée à l'entrée du convertisseur de puissance.

V_m : La tension fournie par le module photovoltaïque au point de la puissance maximale.

III.3.5.1.3. Nombre de module en parallèle :

Le nombre des modules en série est calculé par l'expression suivante [44] :

$$N_{mp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

N_{mp} : Nombre des modules en parallèle.

III.3.5.2. Par la méthode graphique :

Cette méthode est basée sur les abaques de rendement des pompes fournies par les fabricants qui donnent en fonction de l'irradiation globale, la puissance nécessaire développée P_{elec} par les panneaux pour faire fonctionner la pompe dans cette gamme de débit et de HMT. Ce dernier est plus pratique selon des performances des différentes pompes en fonction des conditions de leur utilisation [39].

- Les abaques :

Ce sont des graphes à lecture directe qui facilitent les calculs numériques. Graphiques pour la détermination spontanée des résultats obtenus par des calculs dans un système de ligne prédéfinie et préparé. Les abaques sont utilisés pour une lecture directe sans savoir comment faire des lignes supplémentaires en lisant directement les données situées aux intersections des droites correspondent par la lecture de point concourant en relation avec les besoins de l'intervenant.

Les constructeurs d'équipement élaborent de tels diagrammes sur la base des données calculées ou mesurées. Ce genre de graphe donne la configuration possible d'une électropompe. A titre d'exemple la figure (III.4) montre les caractéristiques de l'électropompe SP14A-3 donnée par le constructeur GRONDFOS [39].

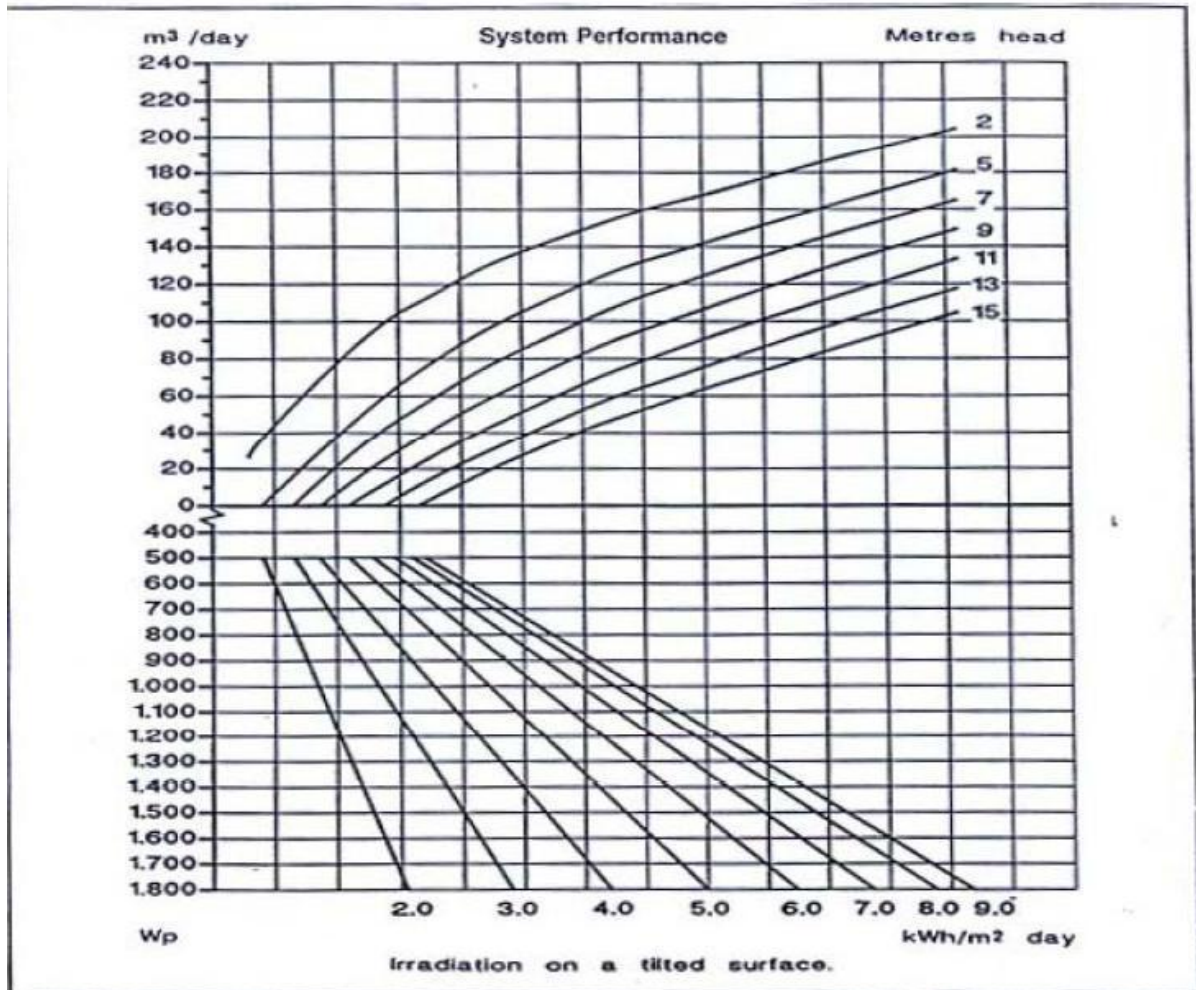


Figure III.4. Courbe typique des performances d'une pompe en conditions d'utilisation [1]

III.3.6. Choix des composants :

III.3.6.1 Choix de la motopompe :

III.3.6.1.1 dimensionnement de la pompe :

Le choix de la pompe est basé sur la consistance à connaître le débit et la hauteur manométrique totale, et le pompage solaire, la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donnée, sur une certaine hauteur, est exprimée en m³/h [44].

$$Q = \frac{3600}{\rho \cdot g \cdot HMT} P_h \quad (\text{III.14})$$

La puissance hydraulique P_h nécessaire en fonction de la puissance électrique crête P_{elec} fournie par le générateur photovoltaïque est donnée par :

$$P_h = P_{elec} \cdot \eta_{MP} \cdot \eta_{ond} \quad (\text{III.15})$$

Chapitre III : Méthodes et bases de calcul des systèmes de pompage et irrigation

Avec :

P_h : La puissance hydraulique.

Ce qui donne le débit fourni par la pompe en fonction de la puissance du générateur.

$$Q = \frac{3600 \cdot \eta_{MP} \cdot \eta_{ond}}{\rho \cdot g \cdot HMT} \cdot P_{elec} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

g : La gravité terrestre (9.81m²/s)

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³).

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné les définitions importantes et nécessaires pour la compréhension de l'étude pratique et on a donné aussi les calculs théoriques de tout l'équipement à utiliser dans notre installation et aussi les calculs de l'énergie totale nécessaire pour réaliser l'application de notre système de pompage photovoltaïque.

Chapitre IV : Etude de cas

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous avons choisi comme zone d'étude, le hameau Hassi Ben Abdellah dans la ville Ouargla du sud algérien. Dans ce chapitre nous allons essayer de présenter convenablement la région

L'élaboration des données concernant le milieu physique à un certain nombre de disciplines spécialisés en climatologie, géologie et ressources en eau.

IV.2. Présentation de la zone d'étude :

IV.2.1 Cadre géographique :

Ouargla est une ville d'Algérie située au Sud de l'Algérie. La vallée de Ouargla comprend plusieurs municipalités, les communes de la Wilaya sont : Ouargla. Rouissat. Aïn Beïda. Sidi Khouiled et NGoussa.

La wilaya d'Ouargla s'étend sur une superficie de 163.230 Km².

Elle est limitée au nord par les wilayas de Djelfa. El Oued et Biskra., à l'Est par la Tunisie, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa, au sud par les wilayas de Tamanrasset et Illizi.

La wilaya d'Ouargla est composée de dix daïra, chacune comprenant une ou plusieurs communes, au totale trente et une communes [45].

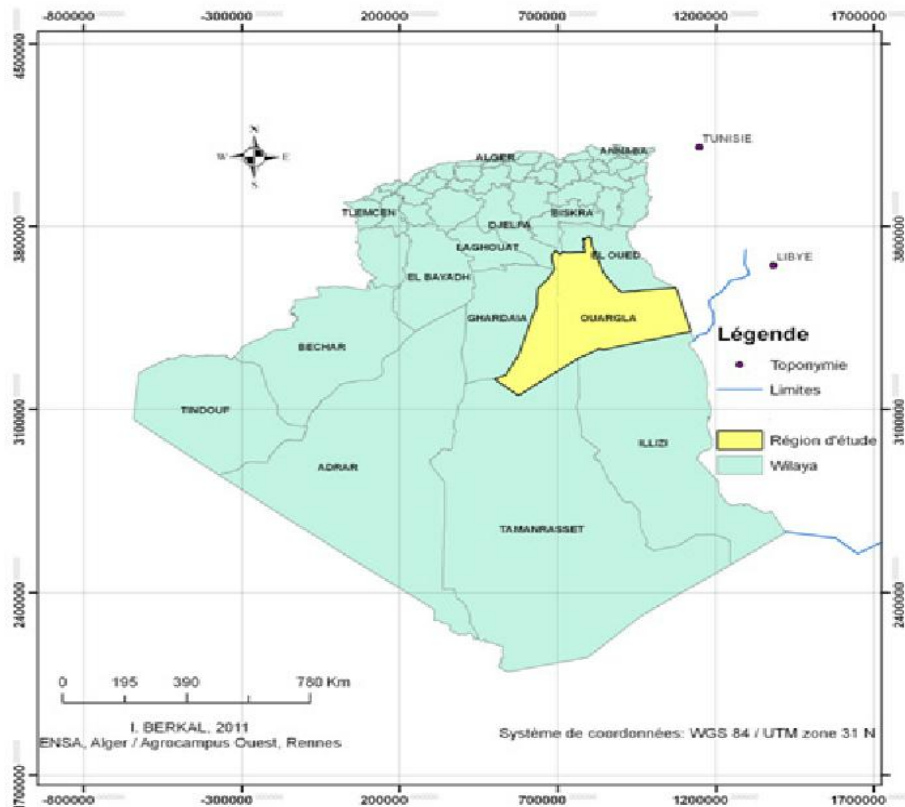


Figure IV.1. Carte de la localisation géographique de l'oasis d'Ouargla [21].

IV.2.2 Cas d'application :

Le périmètre agricole dans lequel se trouve la station est situé à proximité et à l'est de la commune de Hassi Ben Abdellah daïra de sidi Khouiled aux coordonnées suivantes: latitude ($31^{\circ}57'$) et longitude ($5^{\circ}21'$), avec une altitude de 149 m. [28]



Figure IV.2. L'exploitation agricole ITDAS (Google Earth)

Le périmètre s'étend sur une surface de 34.65 hectare répartie comme suit :

Tableau IV.1 Superficie de l'exploitation agricole ITDAS [28].

Surface (Hectare)		
Totale	Parcelle	Piste
34.65	32	2.65

IV.3. Les conditions climatiques :

La Wilaya d'Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation.

IV.3.1. La température :

Les températures sont de type saharien. Elle se caractérise par de forts maximums de température en été et très basses en hiver. La région présente aussi des écarts thermiques importants, entre le maximum pendant le jour et le minimum pendant la nuit. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud est de 46.7°C (mois de juillet) et le plus froid c'est janvier avec une température moyenne de 10.7°C.

Tableau IV.2.Températures moyennes mensuelles (minimales, maximales et moyennes) de la région étudiée durant la période (1991-2021)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
T_{max}	20.7	24.7	30.6	36.7	41.3	45.04	46.7	45.6	42.5	36.2	28.3	21.5
T_{min}	0.7	1.32	4.1	8.3	13.4	18/8	22.8	23.4	18.5	12.3	5.1	1.3
T_{moy}	10.7	12.9	17.3	22.5	27.4	31.9	34.7	34.5	30.5	24.3	16.7	11.4

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

IV.3.2. L'humidité relative de l'air :

L'humidité relative Hr (%) s'exprime par le rapport en pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa), à la pression de vapeur saturante (Pr) dans les mêmes conditions de mesure en température et en pression. L'humidité relative de l'air varie sensiblement en fonctions des saisons [46]. Les valeurs minimales de l'humidité se produisent en juillet et Aout (les mois le plus secs) et par contre en décembre et janvier sont les valeurs maximums (les mois plus humides). Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative varient entre 19% et 60%, les données caractérisant l'humidité relative de l'air de la région d'Ouargla au cours de la période de 1991 à 2021 sont reportées sur le tableau ci dessous :

Tableau IV.3. L'humidité moyenne mensuelle de la région étudiée durant la période (1991-2021).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Hr(%)	60	49.9	41.2	33.6	28.2	22.9	19.4	21.7	31.4	39.3	49.3	60.3

IV.3.3. Précipitation :

La précipitation pour la région est très faible et irrégulière, on voit que le mois le plus pluvieux est le mois de janvier, tandis que le mois le plus sec c'est le mois de juillet. Le régime des précipitations dans la région d'étude est présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.4. La précipitation moyenne mensuelle de la région étudiée durant la période (1991-2021).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
P(mm)	20.6	13.1	13.9	16.4	11.7	1.6	4.2	3.3	14.9	16	15.2	13.6

- **P** : précipitation (mm)

IV.3.4. Le vent

Les vents sont généralement faibles et modérés avec un cycle très long durant l'année. Les vents dominants sont de directions Sud et Sud-Ouest [28].

Tableau IV.5. Vitesse moyenne mensuelle des vents de la région étudiée durant la période (1991-2021).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Vmoy	3.1	3.4	3.9	4.4	4.8	4.7	4.8	3.6	3	3.3	2.5	2.6

- **V** : vitesse de vent (m /s)

IV.3.5. L'insolation :

L'insolation est un facteur important dans la mesure où il influence directement le degré d'activité végétative des cultures. La région est caractérisée par une forte insolation. Les données concernant l'insolation réelle moyenne mensuelle de la région d'étude sont présentées dans le tableau :

Tableau IV.6. La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région d'étude durant la période 1991-2021.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
I	223.2	220.1	260.1	285.1	320.2	332.4	356.7	326.7	273	247	221.1	198.8

- **I** : insolation (h/mois)

IV.3.6 L'évaporation :

L'évaporation est très forte dans cette région. Elle augmente du mois de janvier au mois de juillet et diminue jusqu'au mois de décembre. Dans cette région le maximal de l'évaporation atteint au mois de juillet et le minimum au mois de décembre. Les données de l'évaporation moyennes mensuelles de la région d'étude sont présentées dans le tableau :

Tableau IV.7. L'évaporation moyenne mensuelle de la région d'étude durant la période 1991-2021.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Evapo	110.52	135.6	191.3	245.3	318.2	373.08	495.2	376.2	320	274.01	143.89	107.76

- Evapo : évaporation (mm)

IV.4. Les sols de la région et l'eau d'irrigation :

Les sols sont des réservoirs dont la taille est déterminée par leurs propriétés physiques et la profondeur à laquelle les racines sont disponibles. Ouargla est une zone caractérisée par le sol léger principalement sablonneux. Ils se caractérisent également par une faible teneur en matières organiques, un pH alcalin, une faible activité biologique, une salinité élevée et une bonne ventilation [28].

IV.4.1. Ressource en eau souterraines :

Il existe dans la Wilaya d'Ouargla des ressources en eau souterraine importantes représentées par trois unités : [39]

IV.4.1.1 La nappe phréatique :

La nappe phréatique est souvent proche de la surface, parfois à moins de 1 mètre. Il est généralement de 1 à 2 m au-dessus du sol, mais peut dépasser 18 m au sud d'Ouargla. La qualité de l'eau de cet aquifère est très dégradée. Une très bonne conductivité électrique forte. Elle augmente du sud au nord.

IV.4.1.2. Le Complexe Terminal :

La nappe comprend deux aquifère comme suit :

1. Mio-pliocène :

L'aquifère est contenu dans du sable grossier à une profondeur de 30 à 160 m Le puits artésien jaillissant qui irriguait autrefois la palmeraie d'Ouargla. Cet aquifère du Miocène a été développé en creusant des massifs Puits artésiens depuis le 19ème siècle (1883). Cette nappe est actuellement utilisée pour l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Ouargla.

2. Sénonien :

Les aquifère artésiennes du Sénonien sont exploitées de 140 à 200 m de profondeur. C'est l'aquifère sénonien exploité au forage de Hassi Khefif au nord La ville et Sebkha Safioune ont une profondeur de 400 mètres. Résidu sec à 2.5 et 3.6 g/L. Plusieurs forages dont la plupart pénètrent dans le complexe terminal fournissent une production annuelle de 50 millions de mètres cubes d'eau domestique et agricole.

IV.4.1.3 Continental Intercalaire CI :

L'aquifère Continental Intercalaire couvre 800 000 kilomètres carrés. Elle est L'une des plus grandes réserves souterraines au monde. Dans la région d'Ouargla le toit de la nappe phréatique est à -850 mètres (par rapport au niveau 0). Actuellement il y a deux trous de forage installé en CI pour assurer l'approvisionnement en eau potable dans certaines zones d'Ouargla

IV.4.2 Les caractéristiques techniques de la nappe de la commune Hassi Ben Abdallah :

La nappe de la commune Hassi Ben Abdallah est caractérisée par : [28]

- Nappe capté : Mio-poliocène du Complexe Terminal ;
- Constitution de la zone productive : sable moyen avec passage de sable fin ;
- Profondeur d'investigation : 160m ;
- Profondeur de la zone productive : 110 à 155m ;
- Niveau statique : 30 à 40m ;
- Niveau dynamique : niveau statique + 30m ;

IV.5. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire extraterrestre est le rayonnement solaire qui frappe la surface de la couche atmosphérique. Pour avoir l'irradiation solaire globale (H_0 : MJ/m².Jour) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère on utilise la relation suivante [39] :

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot h_0 (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega s + \frac{\pi}{180} \cdot \omega s \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta) \quad (\text{IV.1})$$

$$h_0 = I_0 [1 + 0.033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot N}{365})] \quad (\text{IV.2})$$

I_0 : La constante solaire ; $I_0 = 1367$ (w/m²)

δ : La déclinaison de soleil.

φ : Latitude de lieu.

N : Numéro du jour de l'année compte de premier janvier.

ω_S : L'angle horaire pour la journée type N de chaque mois, déterminé à partir de l'équation :

$$\omega_S = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (\text{IV.3})$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+N}{365}\right) \quad (\text{IV.4})$$

Pour une grandeur donnée, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapproche de la moyenne mensuelle de cette grandeur. La liste des jours types proposés par Klein est représentée sur le tableau suivant [39] :

Tableau IV.8. Liste des jours types par mois proposés par Klein

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Des
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

IV.5.1. Les coordonnées géographiques terrestres de Hassi Ben Abdellah :

Pour le site. Les coordonnées géographiques terrestres sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.9. Les coordonnées géographiques terrestres.

Longitude	5°21
Altitude	149 m
Latitude	31°57

Pour calculer l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois, on utilise l'équation (1). Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10. Les valeurs de l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère.

Mois	N° de jour	δ la déclinaison [°]	ω_s [°]	H_0 [wh/m ² .j]
Janvier	17	-20.9170	76.4168	5648.3796
Février	47	-12.9546	81.8739	6988.1866
Mars	75	-2.4177	88.5133	8608.0456
Avril	105	9.4149	95.8481	10149.0156
Mai	135	18.7919	102.0690	11117.8651
Juin	162	23.0859	105.1840	11468.4250
Juillet	198	21.1837	103.7768	11265.6869
Aout	228	13.4550	98.4539	10494.0369
Septembre	258	2.2169	91.3630	9144.0736
Octobre	288	-9.5994	84.0347	7447.4402
Novembre	318	-18.9120	77.8467	5953.4951
Décembre	344	-23.0496	74.8432	5263.8014

IV.5.2. 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 [39] :

Indice de la clarté horaire : $K_T = I/I_0$

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

IV.5.3. Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale

IV.5.3.1. Fraction d'insolation :

$$\sigma = \frac{S}{S'} \quad (\text{IV.05})$$

Avec :

$$S' = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (\text{IV.06})$$

Tableau IV.11. Valeurs moyenne d'insolation mensuelle.

Mois	Insolation (h)	Durée d'insolation astronomique S'(h)	Durée d'insolation mesurée S (h)	Fraction d'insolation σ
Janvier	223.2	10.19	7.2	0.71
Février	220.1	10.92	7.8	0.71
Mars	260.1	11.80	8.4	0.71
Avril	285.1	12.78	9.5	0.74
Mai	320.2	13.61	10.3	0.76
Juin	332.4	14.02	11	0.78
Juillet	356.7	13.84	11.5	0.83
Aout	326.7	13.13	10.5	0.80
Septembre	273	12.18	9.1	0.75
Octobre	247	11.20	7.9	0.71
Novembre	221.1	10.38	7.4	0.71
Décembre	198.8	9.98	6.41	0.64

$S(h)$: Durée d'insolation moyenne journalière (mesurée).

$S'(h)$: Durée d'insolation astronomique du jour.

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

$$K_T = \frac{H}{H_0} = a + \sigma b \quad (\text{IV.7})$$

H_0 : L'irradiation solaire globale mensuelle hors atmosphère (J/m²Jour).

H : L'irradiation solaire globale mensuelle au sol (J/m²Jour).

σ : La fraction d'insolation.

a et b : sont les paramètres du modèle pour la région Saharienne d'Algérie :

$$\begin{cases} a = 0.3 \\ b = 0.43 \end{cases}$$

L'irradiation diffuse journalière moyenne H_d par la corrélation de Beeckman :

$$K_d = \frac{H_d}{H} = c - d \cdot K_T \quad (\text{IV.8})$$

Pour la région Saharienne : $\begin{cases} c = 0.91 \\ d = 0.98 \end{cases}$

Tableau IV.12. Les valeurs de l'irradiation globale sur une surface horizontale.

Mois	K_T	H	K_d	H_d
Janvier	0.6039	3410.8291	0.3182	1085.3853
Avril	0.6072	4243.5112	0.3149	1336.2992
Mars	0.6061	5216.9553	0.3161	1648.8990
Avril	0.6196	6288.8018	0.3027	1903.9124
Mai	0.6254	6953.5740	0.2971	2065.6798
Juin	0.6373	7308.4371	0.2855	2086.4078
Juillet	0.6574	7405.8082	0.2658	1968.2426
Aout	0.6439	6757.5588	0.2789	1884.9272
Septembre	0.6212	5680.4676	0.3012	1710.9902
Octobre	0.6032	4492.1332	0.3189	1432.4757
Novembre	0.6066	3611.1756	0.3156	1139.5690
Décembre	0.5762	3033.0408	0.3453	1047.3601

IV.5.4. Calcule de l'irradiation globale journalière sur une surface inclinée :

En utilisant le modèle de Liu et Jordan pour le calcul de l'irradiation globale journalière sur une surface inclinée H_T [39] :

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (\text{IV.09})$$

R_b : Facteur de conversion donné par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \omega'_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta} \quad (\text{IV.10})$$

H_d : La composition diffuse.

H_b : La composante directe donnée par la relation suivante :

$$H_b = H - H_d \quad (\text{IV.11})$$

ρ : L'albédo au sol (0.35).

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.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (\text{IV.12})$$

$$\omega'_s = \text{Min} [\omega_s ; \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan\delta)] \quad (\text{IV.13})$$

IV.5.4.1. Inclinaison d'un angle égale à la latitude :

Les valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation globale incidente sur un plan incliné d'un angle est égale à la latitude géographique de lieu [39].

Tableau IV.13. Les valeurs de l'irradiation globale journalière mensuelle pour une inclinaison égale à l'altitude.

Mois	ω'_s	R_b	H_b	H_T
Janvier	76,4168	1,7318	2325,4438	5120,5260
Février	81,8739	1,4746	2907,2120	5634,2176
Mars	88,5133	1,2227	3568,0562	6024,7769
Avril	95,8481	1,0020	4384,8894	6319,6478
Mai	102,0690	0,8500	4887,8942	6247,4193
Juin	105,1840	0,7834	5222,0293	6212,2209
Juillet	103,7768	0,8128	5437,5656	6433,8136
Aout	98,4539	0,9349	4872,6316	6476,0370
Septembre	91,3630	1,1308	3969,4774	6220,1962
Octobre	84,0347	1,3861	3059,6575	5683,9347
Novembre	77,8467	1,6592	2471,6066	5249,6095
Décembre	74,8432	1,8164	1985,6807	4655,2968

IV.5.4.2. Inclinaison Optimal d'un panneau solaire :

Pour calculer l'angle d'inclinaison optimal pour une irradiation maximal reçue sur un capteur incliné, on fait varier l'angle d'inclinaison dans le jour type du mois afin d'identifier l'angle pour laquelle l'énergie reçue atteint sa valeur maximale.

Tableau IV.14. Les valeurs de l'irradiation globale journalière pour une inclinaison optimale.

Période	L'hiver			Le printemps			L'été			L'automne		
Mois	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov
β_{opt}	61	60	51	35	17	-1	-8	-5	10	28	46	58
H_T [Wh/m ² .j]	5213	5659	5880	6037	6471	6953	7355	7422	6821	6224	5825	5710

IV.6. Système d'irrigation :

Les équipements d'irrigation modernes permettent selon leur nature l'application d'eau suivant diverses méthodes nous avons utilisé la méthode de la micro-irrigation. Cette technique fonctionne en allouant un faible trafic par rapport aux autres méthodes. Il contient une technique d'arrosage spéciale : l'irrigation goutte à goutte. [28]

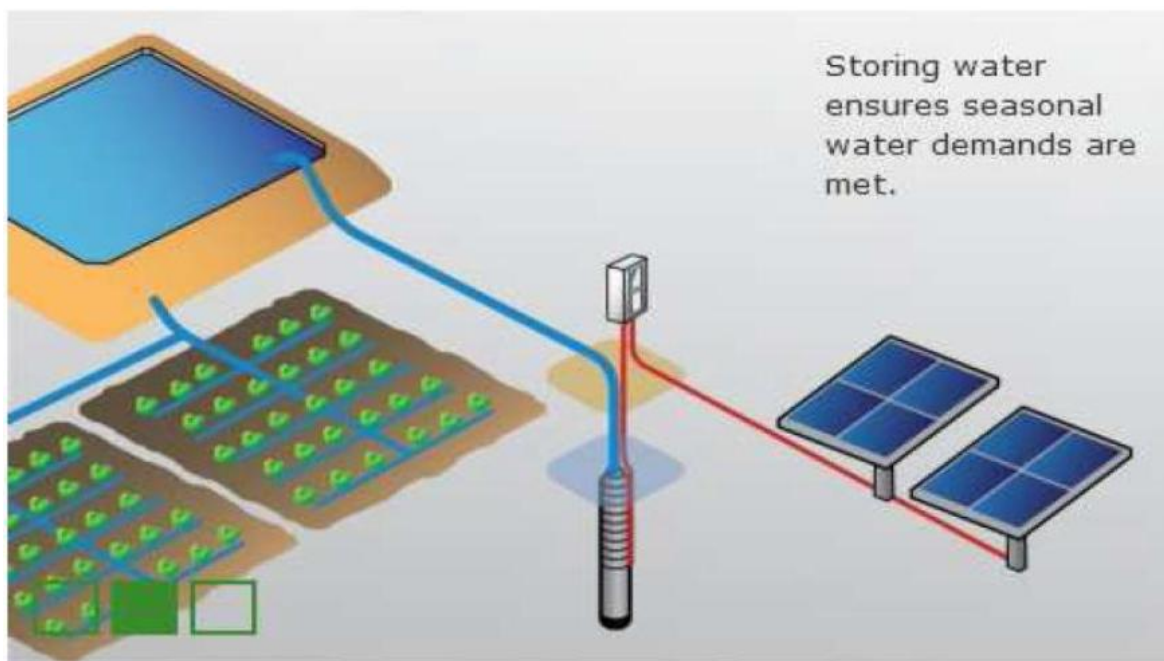


Figure IV.3. Type d'irrigation avec pompage photovoltaïque (la micro-irrigation). [28]

IV.7. Estimation des besoins en eau :

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance des données météorologique et le système d'irrigation qui dépendent aussi des paramètres concernant la plante elle-même [47]. Cependant l'expérience locale et la pratique restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte de besoins.

IV.7.1. Evapotranspiration (ET) :

C'est la perte d'eau sous forme de vapeur, par évaporation de l'eau du sol, de la rosée, de l'eau de la pluie interceptée par les surfaces ainsi que de la transpiration de la plante. Ce terme s'exprime pour la période considérée soit en unité de masse ou de volume par unité de surface, soit en équivalent en hauteur d'eau [48].

IV.7.2. Evapotranspiration potentielle (ETP) ou (ET₀) :

L'évapotranspiration potentielle peut être définie comme étant la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données par une surface d'eau libre, ou un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant. La valeur limite de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible [48].

IV.7.2.1. Evapotranspiration calculée :

Le calcul de l'évapotranspiration est réalisé à l'aide d'un logiciel CROPWAT 8.0.

IV.7.2.1.1. Présentation de logiciel CROPWAT 8.0 :

Le CROPWAT 8.0 est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation. Il a été mis au point par la FAO en 1992, il est basé sur la formule de Penman-Monteith modifiée. Il permet de calculer les besoins en eau des cultures et les quantités d'eau d'irrigation, il offre également la possibilité de développer un calendrier en fonction de diverses pratiques culturales, et d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures et l'efficacité de différentes pratiques d'irrigation.

Tableau IV.15. Les résultats obtenus par le logiciel CROPWAT

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind m/s	Sun hours	Rad MJ/m ² /day	ETo mm/day
January	0.7	20.7	60	3.1	7.2	12.3	2.87
February	1.3	24.7	50	3.4	7.8	15.2	4.19
March	4.1	30.6	41	3.9	8.4	18.8	6.33
April	8.3	36.7	34	4.4	9.5	22.7	8.93
May	13.4	41.3	28	4.8	10.3	25.1	11.17
June	18.8	45.0	23	4.7	11.0	26.5	12.53
July	22.8	46.7	19	4.8	11.5	27.0	13.46
August	23.4	45.6	22	3.6	10.5	24.5	10.95
September	18.5	42.5	31	3.0	9.1	20.4	8.46
October	12.3	36.2	39	3.3	7.9	16.0	6.72
November	5.1	28.3	49	2.5	7.4	12.9	4.00
December	1.3	21.5	60	2.6	6.4	10.8	2.69
Average	10.8	35.0	38	3.7	8.9	19.3	7.69

IV.7.3. Besoin en eau d'irrigation (IB) :

Le besoin d'irrigation est défini comme étant le volume d'eau qui devra être apporté par irrigation. Pour calculer la quantité réelle d'eau à apporter à la culture il faut tenir compte des efficacités de transport, de distribution et d'application de l'eau [24].

$$IB = \frac{IN}{eff} \quad (IV.14)$$

$$IN = ETR \quad (IV.115)$$

Pour calculer les besoins d'irrigation il faut connaître les besoins d'eau réels des cultures (ETM) : (24)

$$ETM = ET_0 \times K_c \quad (IV.16)$$

La dose pratique d'arrosage, dans le cas d'une irrigation traditionnelle, est donnée par la dp (mm) = R_{fu} (mm) Avec R_{fu} est la réserve facilement utilisable.

IB : Irrigation brute (mm).

IN : Irrigation net (mm).

eff : L'efficacité d'irrigation (%). Il dépend du système d'irrigation utilisé, dans le cas de l'irrigation localisée ou micro-irrigation : **eff** = 80% – 90%.

ETM : Evapotranspiration réelles (mm/jour).

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/jour).

K_c : Le coefficient cultural, le K_c pour un palmier dattier adulte vraie en réalité entre (1,21-1,38). Pour notre cas nous avons choisi le K_c proposé par la FAO qui vraie entre (0,9-1).

N : La fréquence d'arrosage.

D_{fc} : Le débit fictif continu du mois de pointe est une notion très importante, c'est un débit supposée donner en continu 24h/24h et tous les jours pour assurer les besoins en eau d'une culture donnée avec $D_{fc} = \frac{V(m^3/ha)}{T}$

T : est le nombre de jours de mois considéré.

D_r: La dose réelle d'arrosage, $D_r = \frac{Beir}{N}$

- Pour le mois de juillet et avec une efficacité de 80% le volume d'eau sera égal :

$$IB = \frac{ETM \cdot K_c}{eff} = \frac{13,46 \cdot 0,95}{0,8}$$

$$IB = 15,983 \text{ mm /jour}$$

Avec :

$$Imm = 10 \text{ m}^3/\text{hectare}$$

$$V = 15,983 \cdot 10^3 = 159,83 \text{ m}^3/\text{jour/hectare}$$

Tableau IV.16. Les besoins d'irrigation traditionnelle des palmiers.

Période	Hiver			Printemps			Été			Automne		
	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.
N jour	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30
P(80%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pu(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kc	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
ETP	2,69	2,87	4,19	6,33	8,92	11,17	12,54	13,46	10,95	8,46	6,72	4
Rfu	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
ETM	2,555	2,726	3,98	6,014	8,474	10,612	11,913	12,787	10,402	8,037	6,384	3,8
Stock d'eau avant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IB (mm)	3,194	3,408	4,975	7,516	10,592	13,264	14,891	15,983	13,003	10,046	7,98	4,75
Stock après	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V (m ³ /ha)	31,94	34,08	49,75	75,16	105,92	132,64	148,91	159,83	130,03	100,46	79,8	47,5
Dfc (l/s/ha)	0,12	0,13	0,19	0,2	0,4	0,5	0,57	0,6	0,49	0,38	0,29	0,18
Dp (m ³ /ha)	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770
N	2	2	2	3	4	4	4	4	4	3	3	2
Dr (m ³ /ha)	15,97	17,04	24,9	25,05	26,48	33,16	37,22	39,95	32,5	33,48	26,6	23,75

V : volume d'eau journalière m³/jour

Chapitre V :
**Dimensionnement du système de pompage
photovoltaïque**

V.Introduction :

Dans le chapitre III nous avons détaillé les techniques et le dimensionnement de pompage solaire photovoltaïques au fil du soleil. Nous allons donc appliquer les techniques étudiées sur notre zone d'étude.

V.1. Système de pompage solaire :

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation et la plantation du palmier dattier représente l'activité agricole principale de la population de Hassi Ben Abdallah. Le besoin d'eau est bien évidemment très fort, en plus, la vallée est située au sud, avec une valeur d'ensoleillement assez élevée. Nous avons choisi l'étude d'un système de pompage qui est utilisée, pour irriguer un hectare de palmiers dans cette région [28].

Le système est caractérisé par trois valeurs suivantes :

- Le volume journalier d'eau à pomper ;
- Le rayonnement solaire journalier reçu par le générateur ;
- La hauteur manométrique totale de pompage ;

V.1.1. Estimation des besoins en eau :

Les besoins d'eau d'été des palmiers pour la région de Hassi Ben Abdallah sont donnés dans le tableau suivant : (Voir chapitre IV)

Tableau V.1. Les besoins journaliers moyens en eau d'été des palmiers / hectare

Période	L'été		
Mois	Juin	juillet	Aout
V (m ³ /j)	148.91	159.83	130.03

V.1.2 Rayonnement solaire :

Les valeurs de rayonnement global journalier calculé sur la moyenne d'été pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimale saisonnier sur le site de Hassi Ben Abdallah Ouargla sont reporté dans le tableau ci-dessus : (Voir chapitre IV)

Tableau V.2. Les valeurs de l'irradiation globale journalière d'été pour une inclinaison optimale.

période	L'été		
Mois	Juin	Juillet	Aout
Hr [Wh/m ² .j]	7355	7422	6821

V.2. Dimensionnement de la station de pompage :

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque concerne : le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de contrôleur répondants au service requis dans les conditions de référence [24].

Pour notre travail, le volume journalier maximal requis est de 159.83 (m³/j) pendant le mois de juillet et l'énergie d'ensoleillement la plus faible pour la saison d'été est égale à 6821 (Wh/m².j).

Pour dimensionner la station de pompage, nous suivons les étapes suivantes :

V.2.1. Choix de la pompe :

Nous choisissons la pompe en fonction du débit et de la Hauteur manométrique totale.

- **Débit horaire :**

Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q}{N_h} \quad (\text{V.1})$$

Avec

Q_h : Débit horaire (m³/h) ;

N_h : Le nombre d'heure d'ensoleillement maximale ;

$$N_h = \frac{6821}{1000} = 6,82 \text{ heures/jours}$$

Dans notre cas, nous prenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} h = 6.82 \text{ heures} \\ Q = 159.83 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{j}}\right) \end{array} \right.$$

$$Q_h = \frac{159.83}{6.82} = 23 \text{ m}^3 / h$$

V.2.2. Model d'irrigation recommandée pour une parcelle d'un hectare de palmier dattier :

Parmi les systèmes d'irrigation moderne économiseurs d'eau, le système d'irrigation localisée ou micro-irrigation est le plus recommandé, ce système peut être adapté convenablement dans les conditions agropédoclimatiques de la région de Hassi Ben Abdellah. Théoriquement son efficacité est de 80%-90%. Sous une pression de 1 bar au niveau des rampes. L'équipement et le dimensionnement typique recommandé d'une parcelle d'un hectare de palmier dattier installé dans les conditions agropédoclimatiques de la région [49] :

Forage

Groupe de pompage

Réservoir

Rampe ($\phi=20\text{mm}$)

Porte rampe ($\phi=75\text{mm}$)

Conduite de tête morte (conduite d'amené eau)

Conduite de refoulement

Espacement entre palmier : 9m×9m (120 palmier/secteur)

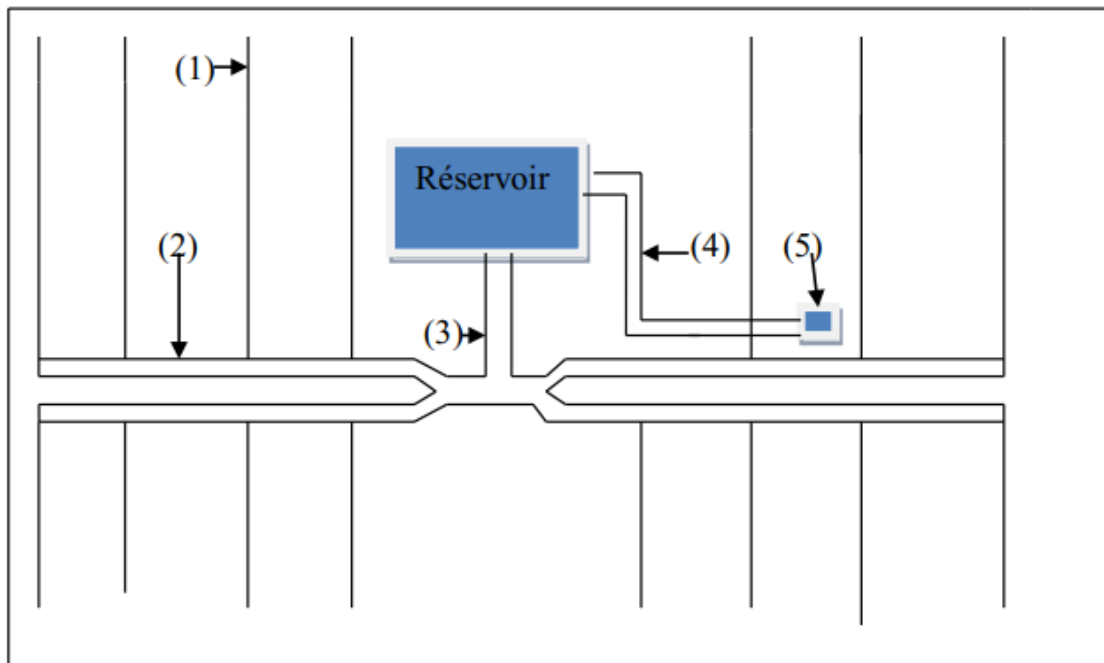


Figure V.1. Schéma représente le réseau d'irrigation localisé

(1) Rampe, (2) ports rampe, (3) conduite de tête morte, (4) conduite de refoulement, (5) forage.

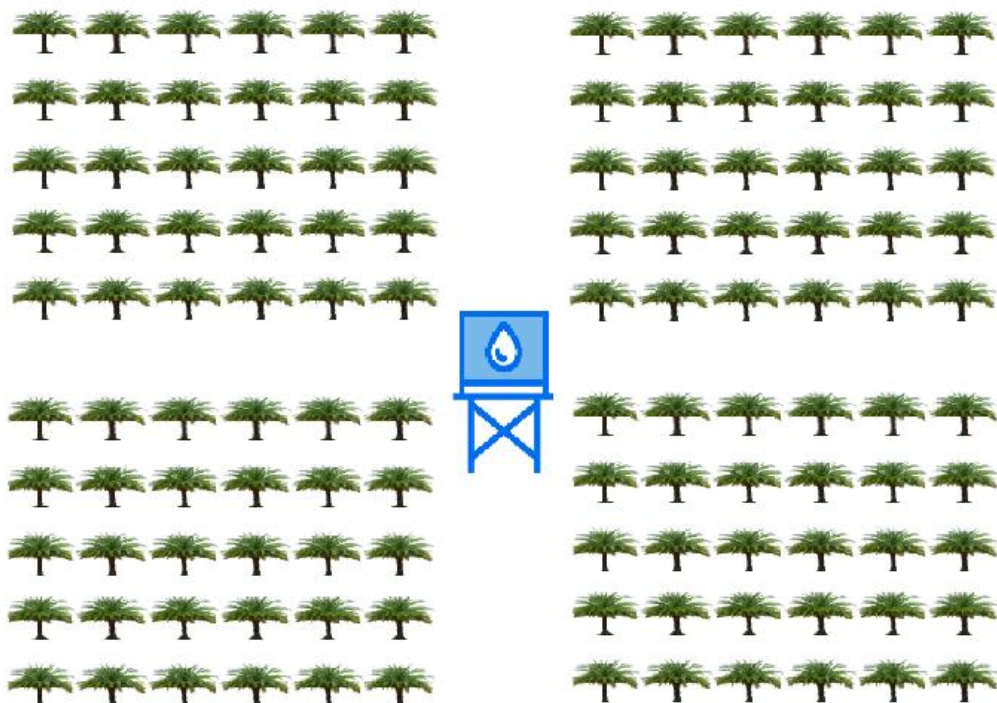


Figure V.2. Schéma représente notre palmier.

V.2.2.1. Dimensionnement de la tête morte et le calage de la cote de réservoir :

Le débit apporté pour la parcelle est $23\text{m}^3/\text{h}$ alors nous allons dimensionner le diamètre de la tête morte :

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{v \cdot \pi}} \quad (\text{V.2})$$

On pose $v = 1\text{m/s}$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 6,4 \times 10^{-3}}{1 \times 3,14}}$$

$$D = 0,09 \text{ m}$$

Soit un diamètre normalisé 100 mm

La vitesse sera :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$v = \frac{4 \times 6,4 \times 10^{-3}}{3,14 \times 0,1^2}$$

$$v = 0,82 \text{ m/s}$$

La vitesse est convenable puisque $0,5 < v < 2,5$

Pour assurer une pression pour fonctionner la parcelle, le calcul doit se faire pour le dimensionnement le plus défavorable.

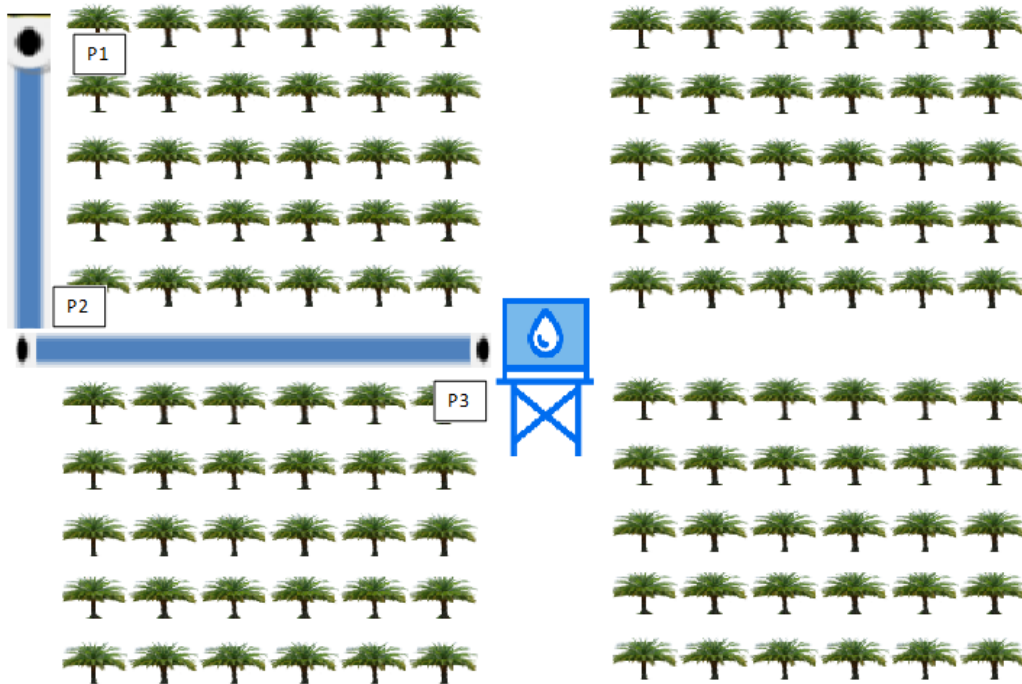


Figure V.3. Schéma représente le cheminement le plus défavorable

Nous allons appliquer l'équation de Bernoulli entre le point P₂ et P₁

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z_{P_1} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z_{P_1} + \Delta H_T \quad (\text{V.3})$$

La vitesse $v < 1\text{ m/s}$ donc $\frac{v^2}{2g}$ est négligeable

P₁ : pression au niveau de gouteur le plus défavorable est 1bar.

P₂ : pression à la sortie du dernier port rampe.

L : la longueur de rampe (100m)

Le débit de rampe est : $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\Delta H_T = P_2 - P_1$$

D'après le tableau de COOLBROUK WHITE on obtient $j=0,02$

$$\Delta H_T = 0,02 \times 100$$

$$\Delta H_T = 2$$

Avec :

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{1,013 \times 10^5}{9,81 \times 1000}$$

$$P_1 = 10 \text{ m}$$

Donc :

$$\frac{P_2}{\rho g} = \Delta H_T + P_1$$

$$\frac{P_2}{\rho g} = 10 + 2$$

$$\frac{P_2}{\rho g} = 12 \text{ m}$$

L'équation de Bernoulli entre le point P₂ et P₃

$$\frac{P_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + Z_{P3} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_{P2} + \Delta H_T$$

$\frac{v^2}{2g}$ Est négligeable

$$\frac{P_3}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + \Delta H_T$$

$$\Delta H_T = j \cdot L \tag{V.4}$$

L : Longueur de porte rampe (200m)

Le débit de porte rampe est : $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\Delta H_T = j \cdot L$$

D'après le tableau de COOLBROUK WHITE on obtient $j=0,005$

$$\Delta H_T = 0,005 \times 200$$

$$\Delta H_T = 1 \text{ m}$$

$$\frac{P_3}{\rho g} = 12 + 1$$

$$\frac{P_3}{\rho g} = 13 \text{ m}$$

Pour assurer le bon fonctionnement du réseau le réservoir doit être porté à une hauteur supérieure ou égale à 13 m par rapport au sol.

V.2.3. Capacité de réservoir :

La technique choisie pour notre étude de pompage appelé. « au fil de soleil », le stockage d'eau doit être effectué dans un réservoir hydraulique. La capacité de réservoir doit être calculée pour répondre au besoin d'eau pendant les jours d'autonomie. La capacité de stockage est calculée pour assurer 2 jours d'autonomie à une hauteur de 5m.

Le réservoir obtenu a une capacité utile de 319,66 m³ soit 320 m³.

V.2.4. Dimensionnement de la conduite refoulement :

Nous avons dimensionné la conduite de refoulement par la formule de BRESSE et celle BONIN. Nous choisirons le diamètre qui donne une vitesse proche de 1m/s.

La formule de BRESSE

$$D = 1,5 \left(Q^{\frac{1}{2}} \right) \quad (\text{V.5})$$

$$D = 1,5 (6,4 \times 10^{-3})^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 0,12 \text{ m.}$$

La vitesse est :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$v = \frac{4 \times 6,4 \times 10^{-3}}{3,14 \times 0,12^2}$$

$$v = 0,56 \text{ m/s}$$

Par la formule de BONIN :

$$D = Q^{\frac{1}{2}} \quad (\text{V.6})$$

$$D = 0,08m. \text{ Soit } 0,1m$$

Avec une vitesse :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$v = 0,82 \text{ m/s}$$

Nous choisissons le diamètre normalisé $D_n = 100 \text{ mm}$ qui assure la vitesse la plus proche de 1 m/s (vitesse convenable).

- **Hauteur manométrique totale :**

$$HMT = Hg + \Delta H_T \quad (\text{V.7})$$

$$Hg = Nd + Hr$$

Le niveau dynamique pour notre station de pompage est de 70 m . Elle correspond à la nappe du Mio-Pliocène qui est utilisée depuis 1883 pour l'irrigation des palmiers, et pour la hauteur de refoulement est : 18 m .

Donc :

$$Hg = 70 + 18 = 88 \text{ m}$$

$$\Delta H_T = \Delta H_s + \Delta H_l$$

Avec

$$\Delta H_s = 15\% \Delta H_l$$

$$\Delta H_l = j \cdot L$$

L : la longueur de conduite (notre conduite 120 m)

J : perte de charge unitaire

On a un débit de 23m³/h avec un diamètre normalisé de 100 mm, la perte de charge unitaire est déterminer avec le tableau de coolbrok WHITE.

On prend $K = 2.10^{-3}$ on obtient $j = 0,015912$

Donc :

$$\Delta H_l = 0,015912 \times 120 = 1,9 \text{ m}$$

$$\Delta H_s = 15\% \times 1,9 = 0,286 \text{ m}$$

$$\Delta H_T = 1,9 + 0,286 = 2,186 \text{ m}$$

$$HMT = 88 + 2,186 = 90,186 \text{ m}$$

Pour notre étude, nous avons fait appel au catalogue Lorentz, pour choisir et pour dimensionner le système de pompage de notre palmeraie, la pompe immergée de type PSk2-15 C-SJ30-12 est capable de répondre à nos besoins (débit et la hauteur manométrique), les caractéristiques relatives à l'installation de pompage sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V.3. Les caractéristiques techniques de la motopompe et du contrôleur [50].

La pompe	
Marque	Lorentz
Type	Pompe immergée PSk2-15 C-SJ30-12
Débit maximal	39 m ³ /h
Hmt maximal	100 m
Moteur triphasé à courant alternatif et à haut rendement	
Efficacité maximal	80%
Submersion maximal	150 m
Contrôleur PSk2-15	
Puissance maximal	15 KW
Tension nominale	530 V
Tension d'entrée	850 V
Intensité de moteur maximal	24 A
Efficacité maximal	98%
Température ambiante	-30 °C.50 °C

V.2.5. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

$$E_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \frac{HMT}{3600} \quad (\text{V.8})$$

$$E_h = 10^3 \cdot 9,81 \cdot 159,83 \cdot \frac{90,186}{3600}$$

$$E_h = 39279,31 \text{ WH/j}$$

V.2.6. Calcul de l'énergie électrique :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{ond}} \quad (\text{V.9})$$

$$E_e = \frac{39279,731}{0,80,98}$$

$$E_e = 50101,17 \text{ WH/j}$$

V.2.7. La taille du générateur photovoltaïque :

Nous avons choisi le module de panneau solaire mono cristallin VICTRON 360W (360Wc - 24V). Le module est composé de 72 cellules solaires connectées en série pour produire une puissance maximale à 360W. Les caractéristiques électriques de ce module sont données par le tableau suivant :

Tableau V.4. Caractéristiques électriques du module PV (VICTRON 360Wc-24V)
[50].

Puissance maximal (Pmax)	360W
Tension à Pmax(V _{mp})	38,4V
Courant à Pmax (I _{mp})	9,38A
Courant de court-circuit (I _{sc})	10,24A
Tension à circuit ouvert (V _{oc})	47,4A
Coefficient de température I _{sc} (%)	+0,04/°C
Coefficient de température V _{oc} (%)	-0,35/°C
Coefficient de la température de la puissance nominal (Pmax)	-0,45/°C
NOCT (Nominal operating Cell temperature)	-40°C à +85°C

V.2.5.1. Calcul de la puissance crête :

$$P_{elec} = \frac{G}{F_m \cdot G_d [1 - \gamma(T - T_{ref})]} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} \cdot \eta_{ond}} \quad (\text{V.10})$$

$$F_m = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (\text{V.11})$$

$$F_m = \frac{360}{47,4 \times 10,24}$$

$$F_m = 0,741$$

$$P_{elec} = \frac{1000}{0,741 \times 6821 \times [1 - 0,004(35 - 25)]} \times 50101,17$$

$$p_{emec} = 10325,48W$$

V.2.5.2. Nombre de module nécessaire :

$$N_m = \frac{P_{elec}}{P_M} \quad (\text{V.12})$$

$$N_m = \frac{10325,48}{360}$$

$$N_m = 28,68 \text{ soit } 29 \text{ module}$$

V.2.5.3. Nombre de modules en série :

$$N_{ms} = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (\text{V.13})$$

$$N_{ms} = \frac{530}{38,4}$$

$$N_{ms} = 13,8 \text{ soit } 14 \text{ modules}$$

V.2.5.4. Nombre de modules en parallèle :

$$N_{mp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (\text{V.14})$$

$$N_{mp} = \frac{29}{14}$$

$$N_{mp} = 2,07 \text{ soit } 2 \text{ modules}$$

V.2.5.5. 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. Donc il faut les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

La puissance de crête corrigée sera égale :

$$P_{elec} = 10000 \text{ W}$$

Le nombre de modules sera égal :

$$N_m = \frac{10000}{360}$$

$$N_m = 27,77 \text{ soit } 28 \text{ modules}$$

Le nombre de modules en parallèle sera égal :

$$N_{mp} = \frac{28}{14}$$

$$N_{mp} = 2 \text{ modules}$$

V.3 .Logiciel simulation d'un système de pompage solaire :**V.3.1. Présentation de logiciel de simulation PVSYST :**

PV SYST est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais aussi c'est un outil pédagogique très utile. PV SYST est un outil numérique de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse information telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'information pour une étude très complète.

Ce logiciel possède des bases de données très riches des panneaux, régulateurs, batteries, onduleurs, pompe solaire... etc, et une base de données météorologique très puissante qui couvre plus de 95 pays.

V.3.2. Etape de la simulation d'un système de pompage solaire par PV SYST 7.2 :

Etape N01

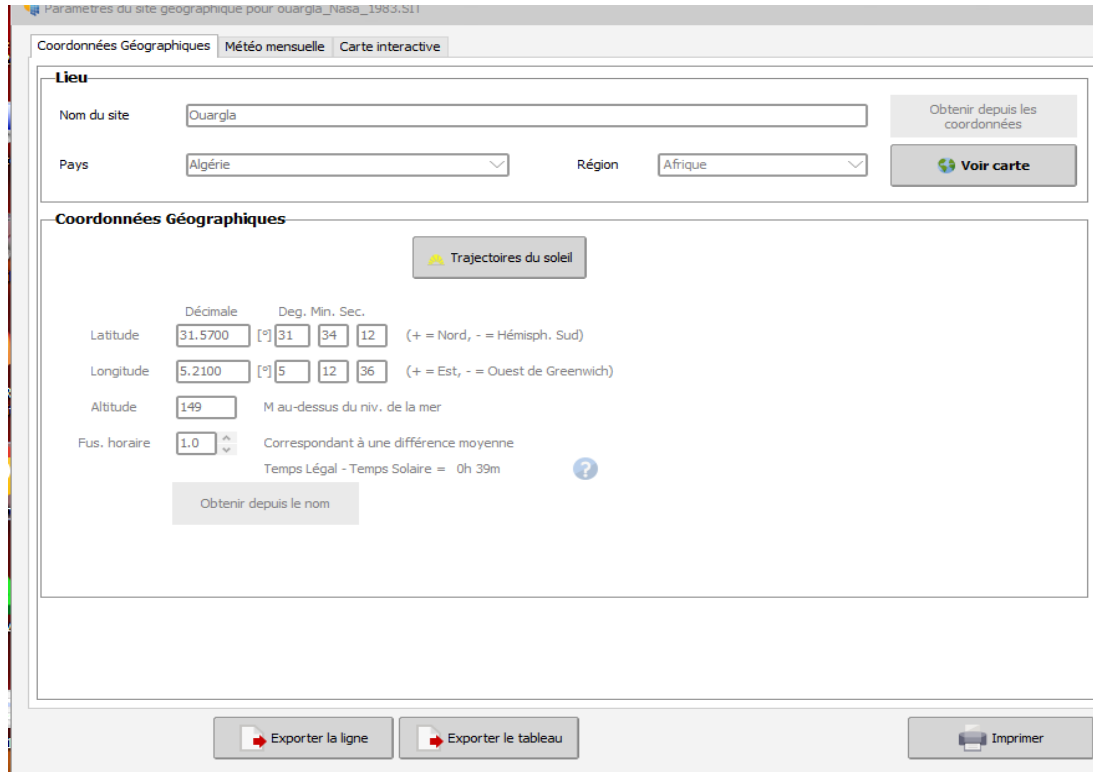


Figure.V.4.Paramètre de site géographique

Etape N02 :

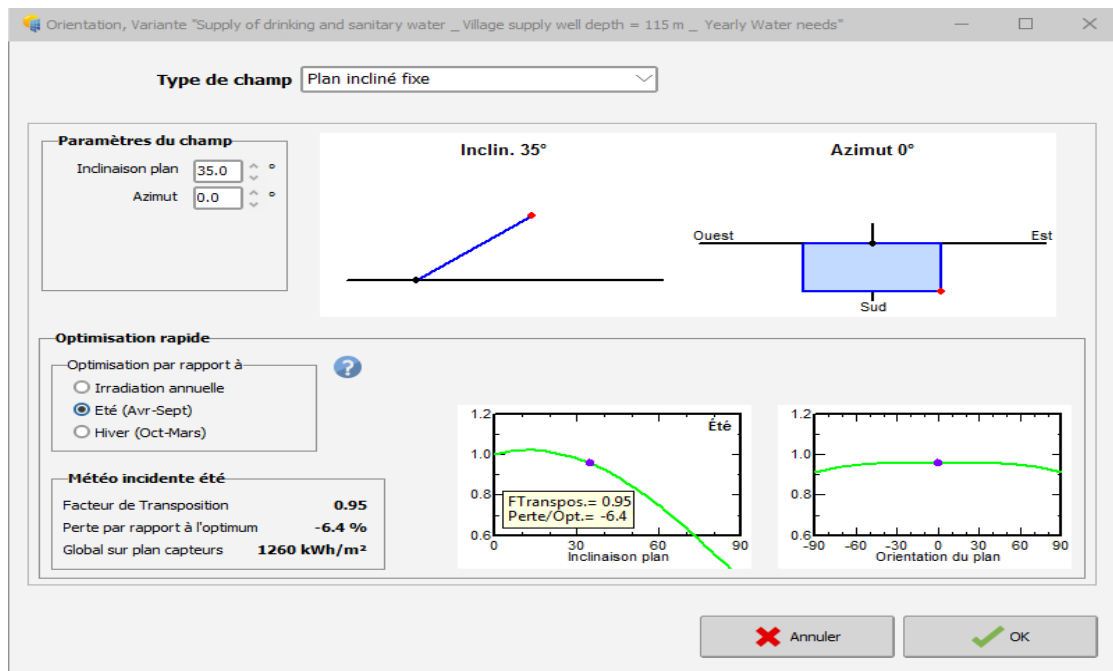


Figure V.5. Choisisra de l'orientation.

Etape N03 :

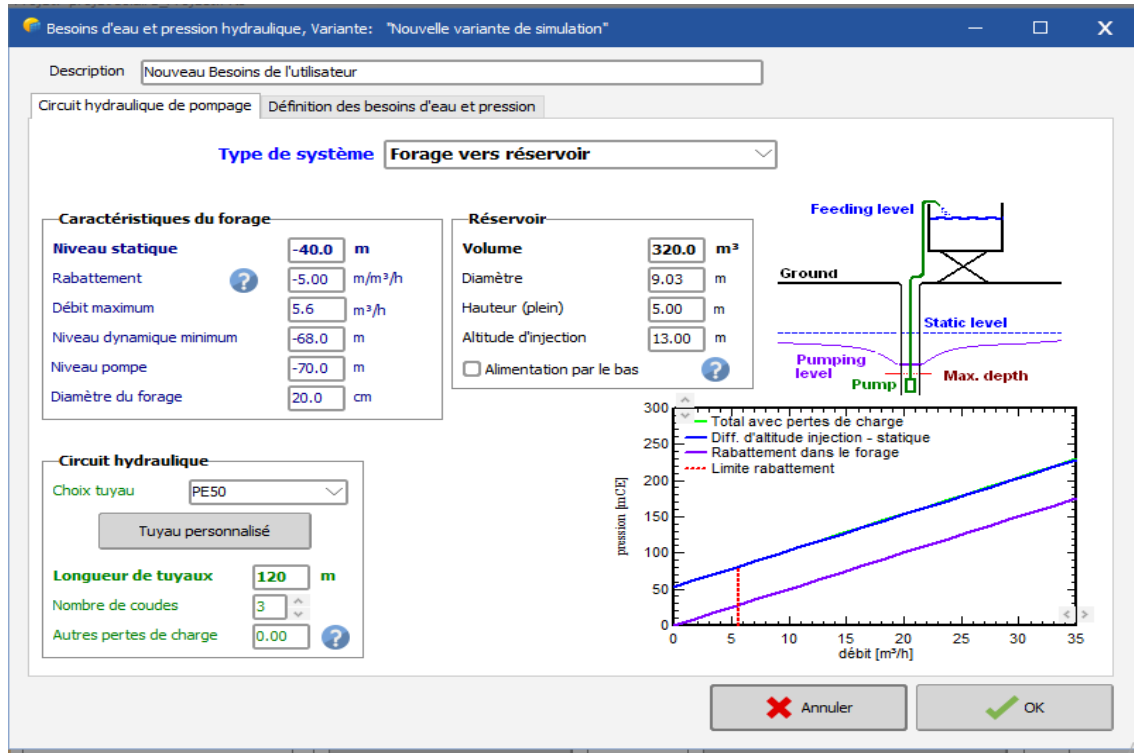


Figure V.6. Besoin en eau et hydraulique

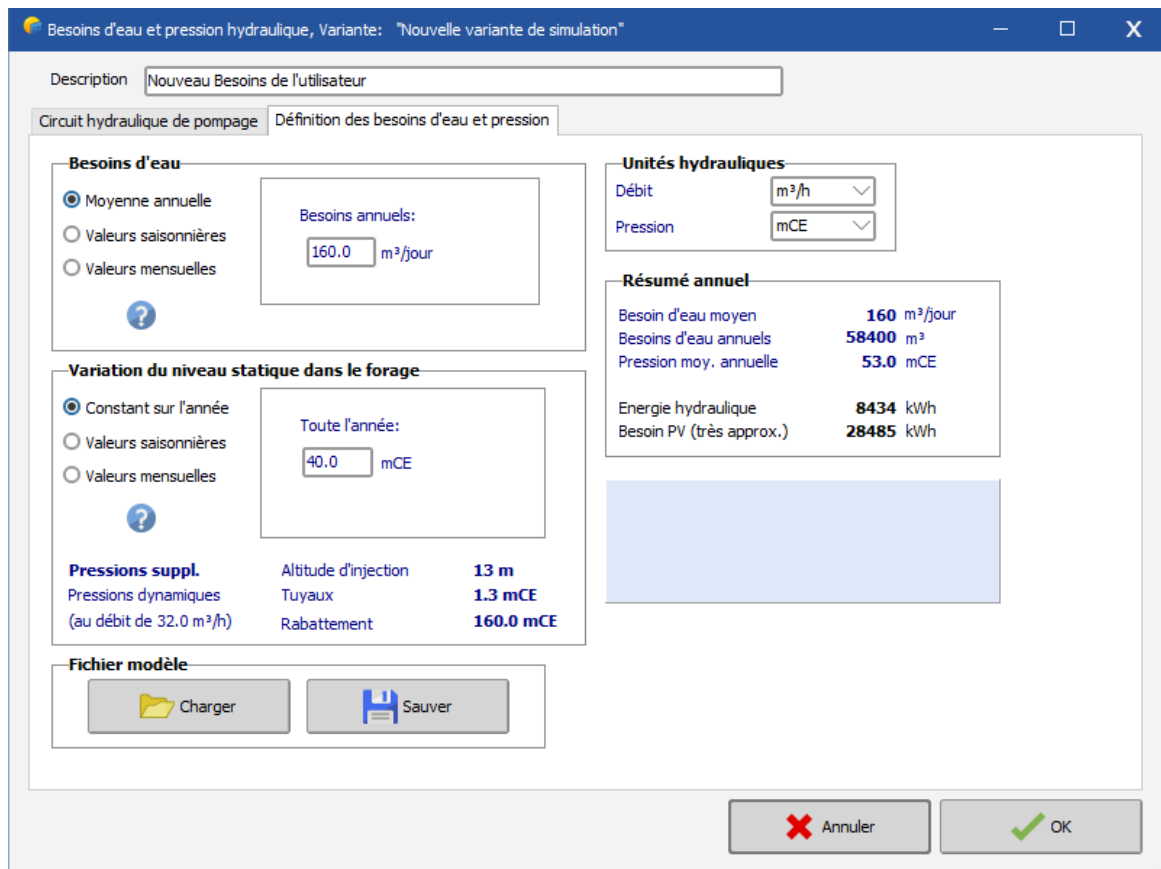


Figure V.7. L'eau a besoin quotidiennement et annuellement

Etape N04

Définition d'un système de pompage, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Suggestions de pré-dimensionnement

Besoins en eau journaliers moyens :
 Pression min. 53.0 mCE
 Pression max. 81.1 mCE
 Volume 160.0 m³/jour
 Puissance hydraulique 5845 W (très approximatif)

Autonomie requise 2.0 Jours
 Manque accepté 5.0 %

Volume réservoir conseillé 320 m³
 Puissance pompe conseillée 9.0 kW
 Puissance PV conseillée 11.4 kWc (nom.)

Définition pompe Conception du sous-champ

Choix d'un modèle de pompe

Lorentz

14.0 kW 50-100 m Well, AC, Centrifuge multi-étages PS15k2 C-SJ30-12 Depuis 1967

1 Pompes en cascade ?
 1 Pompes en parallèle

Caractéristiques de la pompe

Technologie pompe	Centrifuge multi-étages		
Moteur	Moteur AC triphasé		
Puissance maximale	14000 W	Tension	700 V
		Courant max.	17.1 A
Pression Min / Nom / Max	50	80	100 mCE
Débit corresp.	39.1	31.4	26.3 m³/h
Puissance corresp.	12000	12000	12000 W
Efficacité	44.4	57.0	59.8 %

Unités pour ce projet

Débit m³/h
 Pression mCE
 Puissance kW
 Énergie kWh

Outil de calcul énergie hydraulique

Vous pouvez définir n'importe quelles valeurs, pas nécessairement liées à votre projet

Débit 26.3 m³/h
 Pression 185.6 mCE
 Puissance 13.323 kW

Le débit de la pompe est légèrement surdimensionné par rapport aux besoins.

Activer Windows
 Accédez aux paramètres

Annuler OK

Figure V.8. Choisir un modèle de pompe

Etape N05 :

Définition d'un système de pompage, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Suggestions de pré-dimensionnement

Besoins en eau journaliers moyens :		Autonomie requise	2.0 Jours	Volume réservoir conseillé	320 m ³
Pression min.	53.0 mCE	Manque accepté	5.0 %	Puissance pompe conseillée	9.0 kW
Pression max.	81.1 mCE			Puissance PV conseillée	11.4 kWc (nom.)
Volume	160.0 m ³ /jour				
Puissance hydraulique	5845 W (très approximatif)				

Définition pompe Conception du sous-champ

Information système

Pompe choisie	PS15k2 C-SJ30-12	Pression	50.0 - 100.0 mCE
Technologie	Centrifuge multi-étages	Débit	39.14 - 26.34 m ³ /h
Puissance max.	14000 W		

Aide au dimensionnement

Pas de prédim. Entrez Pnom désirée kWc

... ou surface disponible m²

Sélection du module PV

Disponibles

Victron Energy

360 Wp 32V	Si-mono	SPM-043602400-360Wc	Depuis 2022
------------	---------	---------------------	-------------

Ouvrir

Modules nécessaires approx. N/D Dimens. des tensions : Vmpp (60°C) 31.8 V
Vco (-10°C) 53.1 V

Choisissez le mode de régulation et le régulateur

Régulateur universel mode de régulation Onduleur MPPT-AC

Tous les fabricants

1000 W	Onduleur MPPT-AC	Universal MPPT - AC Inverter	Generic device	Adaptabl
--------	------------------	------------------------------	----------------	----------

Ouvrir

Les paramètres de fonctionnement du régulateur universel seront automatiquement ajustés selon les propriétés du système.

Conception champ PV

Nombre de modules et chaînes

Mod. en série doit être: seule possibilité 15

Perte surpuissance N/A

Rapport Pnom N/A

nbre modules 30 Surface 58 m²

Cond. de fonctionnement

Vmpp (60°C)	318 V
Vmpp (20°C)	386 V
Vco (-10°C)	531 V

Irradiance plan 1000 kWh/m²

Imp	28.6 A	Puiss. max. en fonctionnement	9.6 kW
Isc	30.7 A	(à 1000 W/m ² et 50°C)	
Isc (aux STC)	30.7 A	Puiss. nom. champ (STC)	10.8 kWc

Le débit de la pompe est légèrement surdimensionné par rapport aux besoins.

Annuler OK

Figure V.9. Choisissez un modèle PV.

Rapport de simulation :

Résumé du projet

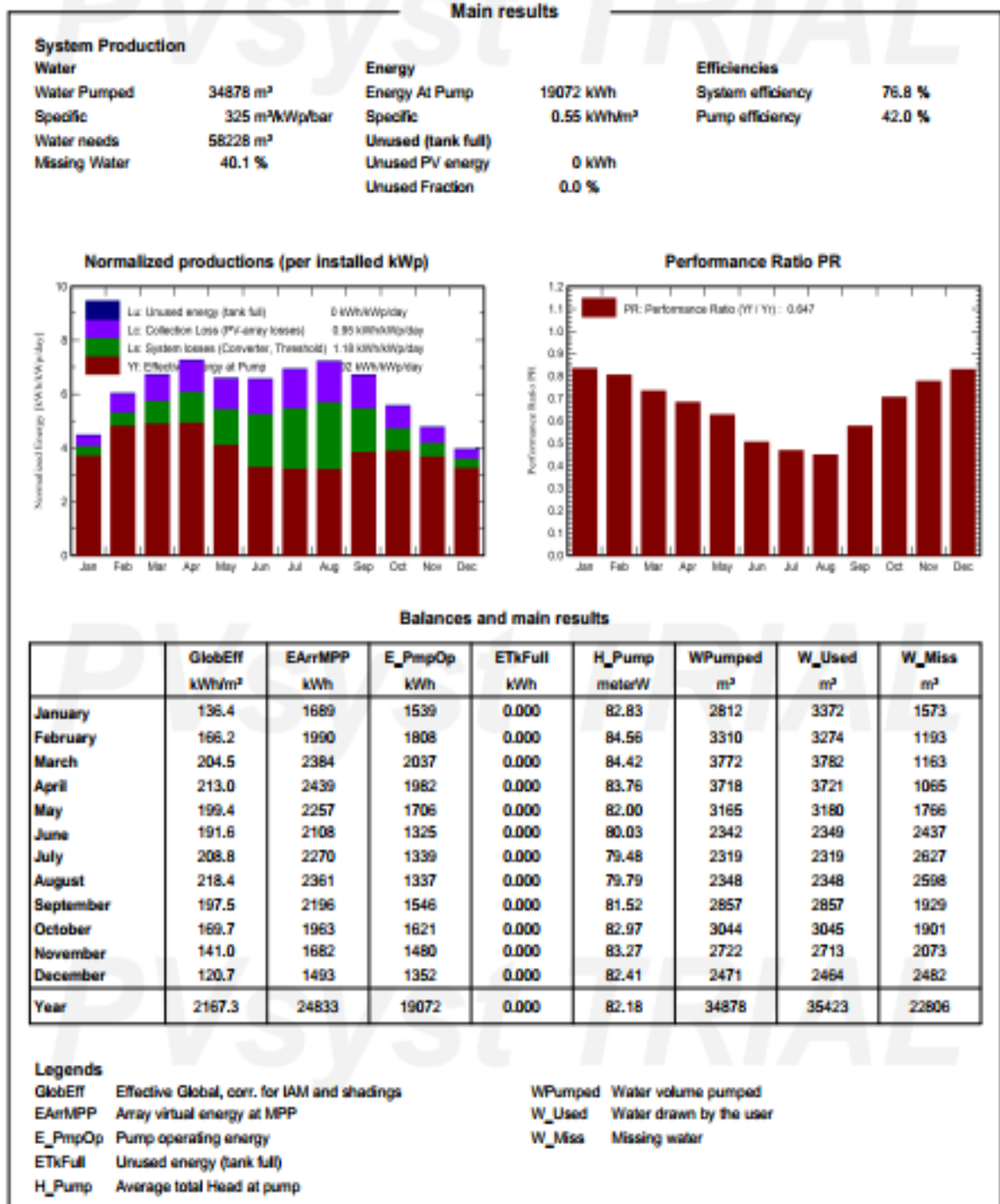
Site géographique	Situation	Paramètres du projet
Ouargla	Latitude 31.57 °N	Albédo 0.20
Algérie	Longitude 5.21 °E	
	Altitude 149 m	
	Fus. horaire UTC+1	
Données météo		
ouargla		
Meteonorm 8.0 (1991-2010), Sat=100 % - Synthétique		

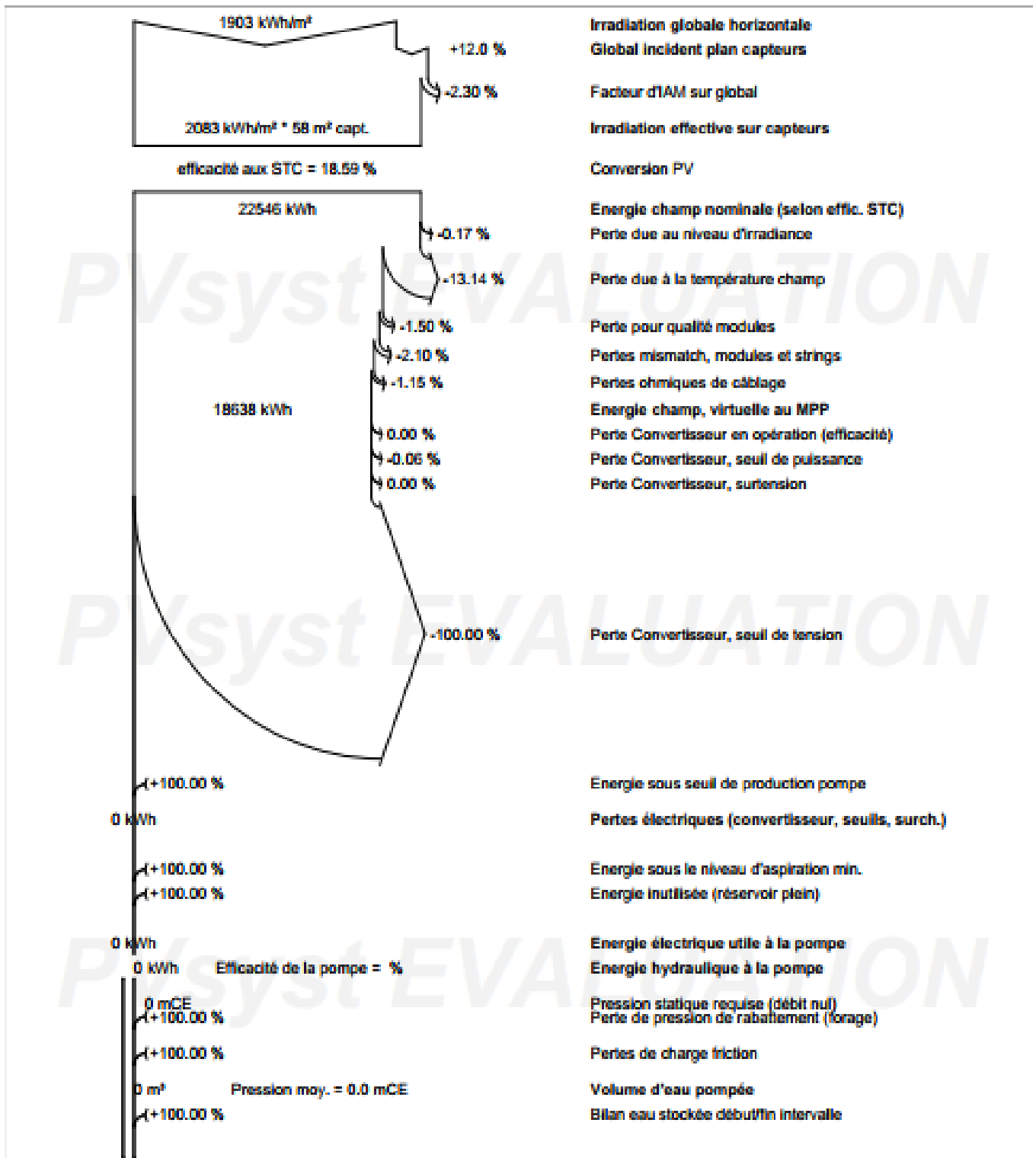
Résumé du système

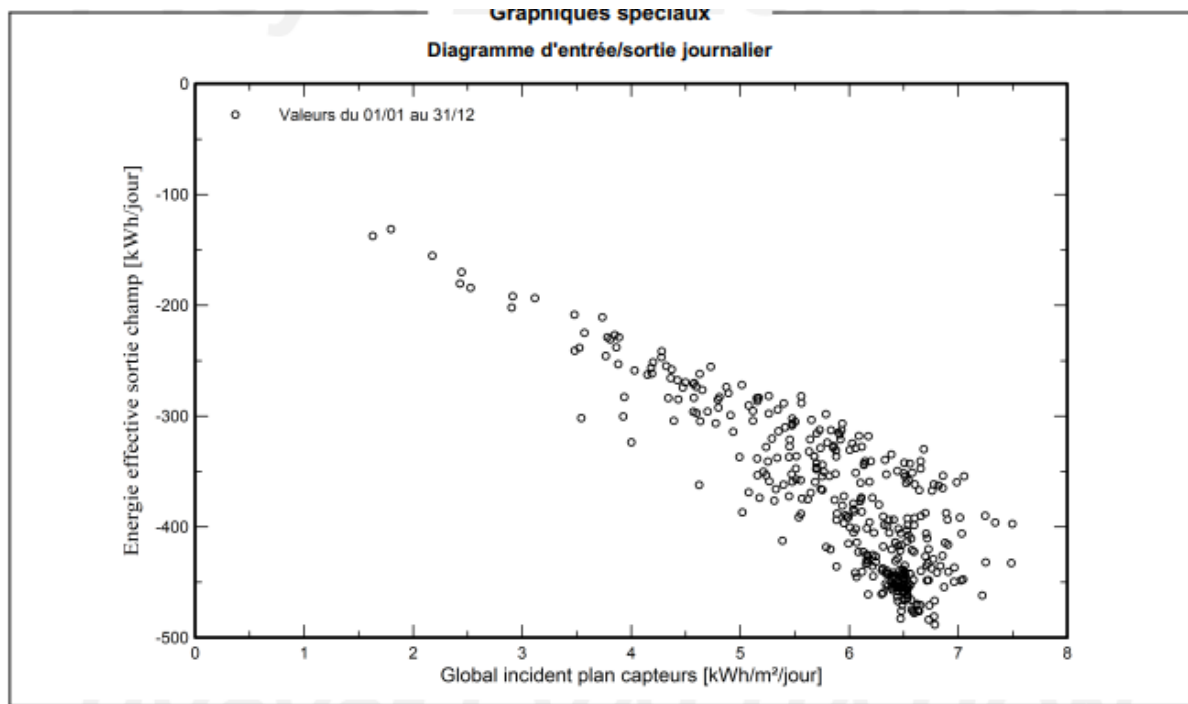
Système de pompage PV	Forage vers réservoir
Orientation plan capteurs	Besoins d'eau
Plan fixe	Constant sur l'année 160.00 m³/jour
Inclinaison/Azimut 35 / 0 °	
Information système	
Champ PV	
Nombre de modules 30 unités	
Pnom total 10.80 kWc	

Paramètres généraux

Système de pompage PV	Forage vers réservoir	
Besoins du système	Caractéristiques du forage	Réservoir
Pression de base 53 mCE	Prof. du niveau statique -40 m	Volume 320.0 m³
Besoins d'eau	Rabattement -5.00 m/m³/h	Diamètre 9.0 m
Constant sur l'année 160.00 m³/jour	Diamètre 20 cm	Alimentation par le haut
	Niveau pompe -70 m	Altitude d'injection 13.0 m
	Niveau dynamique minimum -68 m	Hauteur (niveau plein) 5.0 m
Circuit hydraulique	Orientation plan capteurs	
Longueur de tuyaux 120 m	Plan fixe	
Tuyaux PE50	Inclinaison/Azimut 35 / 0 °	
Dint 100 mm		







V.4. Analyse économique des systèmes de pompage photovoltaïque :

En générale, le calcul des coûts de la production d'électricité par l'énergie solaire photovoltaïque obéit aux mêmes règles que les solutions classiques. Nous étudierons séparément les coûts d'exploitation (entretiens et maintenance).

V.5 .Evaluation du coût globale actualisé de 1m³ d'eau pompé :

Pour évaluer le coût global actualisé de 1m³ d'eau pompé, il est nécessaire d'avoir certaines données, à savoir [39] :

- la durée de vie de chaque composante.
- Le coût ou l'investissement initial.
- Les coûts de maintenances annuels relatifs au système photovoltaïque.
- Les coûts de remplacements des différents sous-systèmes.

Nous remarquons que parmi les données ci-dessous, quelques-unes sont connues, les autres sont estimées.

V.5.1. Calcul de l'investissement initial total :

Pour savoir quel est le prix qu'il va devoir payer lors de l'installation du système il faut l'investissement initial. Le coût total est calculé par la relation suivante [39] :

$$I_{total} = C_{GPV} + C_{MP} + C_{con} + C_{ACC} \quad (\text{V.15})$$

Sachant que :

C_{GPV} : Le coût de générateur PV est calculé par :

$$C_{GPV} = P_M \times N_m \quad (\text{V.16})$$

Avec :

P_M : Prix de modules

N_m : Nombre de modules

C_{MP}, C_{con}, C_{ACC} Sont respectivement coût d'électropompe, contrôleur et accessoire.

V.5.2. Calcul des coûts sur la durée de vie :

Le coût global annuel de la valeur actualisée est calculé par l'expression suivante :

$$C = A_{Total} + E_{Totale} \quad (\text{V.17})$$

Avec :

A_{Total} : Amortissement total.

E_{Totale} : L'entretien et la maintenance totale.

V.5.2.1. Calcul de l'amortissement total :

Pour calculer le coût de l'énergie en tenant compte de l'amortissement sur le temps, on prend en compte dans nos calculs, la durée de vie des composants ainsi que les profits réalisés sur toute la durée active du système [39].

$$A = \frac{C}{N} \quad (\text{V.18})$$

Avec :

C : coût d'investissement initial de chaque composant.

N : Durée de vie active de composant.

Pour calculer l'amortissement annuel total du système par la formule suivante :

$$A_{Total} = A_{GPV} + A_{MP} + A_{con} + A_{Acc} \quad (V.19)$$

Sachant que l'amortissement de chaque composant calculé comme suite :

❖ Amortissement de générateur :

$$A_{GPV} = \frac{C_{GPV}}{N_1} \quad (V.20)$$

❖ Amortissement d'électropompe et contrôleur :

$$A_2 = \frac{C_2}{N_2} \quad (V.21)$$

❖ Amortissement des accessoires :

$$A_{Acc} = \frac{C_{Acc}}{N_3} \quad (V.22)$$

On note que les hypothèses retenues, relatives à la durée de vie pour chacun des éléments du système, sont données dans le tableau suivant [50] :

Tableau V.5. Le cout total de l'investissement et l'amortissement du système PV.

Equipement	Investissement (DA)	Durée de vie (Ans)	Amortissement (DA)
Générateur PV (28 modules)	1680000	20	84000
La pompe et son contrôleur	485000	10	48500
Accessoire	142000	20	7100
Total	2307000		139600

V.5.2.1. Calcul de l'entretien et de la maintenance total :

Malgré la fiabilité des pompes solaires, il est indispensable de veiller à leur bon fonctionnement par un entretien périodique. Dans la mesure où les hypothèses de départ peuvent être différentes, le coût de l'entretien est très difficile à évaluer dans le temps. Pour calculer un coût moyen annuel, l'approche la plus raisonnable est basée sur une

expérience vécue sur le terrain qui est aussi théorique qu'elle soit, donnerait un ordre de grandeur réaliste [39].

Le calcul de coût d'entretien total annuel du système est donné par l'expression :

$$E_{Tot} = E_{GPV} + E_{MP} + E_{con} + E_{Acc} \quad (V.23)$$

Sachant que le coût de l'entretien de chaque composant est calculé comme suit :

- ❖ Le coût de l'entretien du générateur :

$$E_{GPV} = C_{GPV} \times Rt_1 \quad (V.24)$$

- ❖ Le coût de l'entretien du groupe électropompe et le contrôleur :

$$E_2 = C_2 \times Rt_2 \quad (V.25)$$

- ❖ Le coût de l'entretien des accessoires :

$$E_{Acc} = C_{Acc} \times Rt_3 \quad (V.26)$$

Rt_1, Rt_2, Rt_3 Sont les coefficients d'estimations du coût de l'entretien par rapport à l'investissement initial des composants.

Tableau V.6. Calcul de l'investissement et de l'entretien total de système PV

Equipement	Investissement (DA)	Rt (%)	Coût Entretien (DA)
Générateur PV (28 modules)	1680000	2	33600
Pompe	390000	2	7800
Contrôleur	95000	5	4750
Accessoire	142000	2	2840
Total	2307000		48990

Nous remarquerons que le coût le plus important correspond au générateur photovoltaïque lui-même. La puissance du générateur qui fait varier le prix, la puissance des accessoires a très peu d'influence sur le coût de l'ensemble.

Le coût global annuel du système photovoltaïque est égal :

$$C = A_{Total} + E_{Totale} \quad (V.27)$$

$$C = 139600 + 48990$$

$$C = 188590 \text{ DA}$$

D'autre part le besoin moyen annuel en eau est égal à 58228.45 m³/ans, pour calculer le coût de 1m³ d'eau pompé nous avons utilisé l'équation suivant :

$$C_m = \frac{C_g}{B_A} \quad (\text{V.28})$$

Avec :

C_m : Le coût de 1m³ (DA).

C_g : Le coût global du système photovoltaïque.

B_A : Besoin moyenne annuel en eau m³/ans.

$$C_m = \frac{188590}{58228.45}$$

$$C_m = 3.23 \text{ DA}$$

V.6. L'énergie consommée par la pompe :

Pour transférer une certaine quantité d'eau d'un point à un autre, la pompe doit transférer de l'énergie au liquide, cette énergie est la même quelle que soit la technologie et est fournie par la puissance de la pompe. Cette puissance est calculée à l'aide du théorème de Bernoulli et le bilan énergétique du système est à prendre en compte tous les paramètres tels que la hauteur de pompage et de refoulement, la longueur et le diamètre des tuyaux. Cependant, pour simplifier tous ces calculs, les praticiens utilisent deux paramètres pour caractériser tous les systèmes de pompage dans le réseau : Débit, Hauteur Manométrique Totale [21].

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est alors donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{Q \times HMT}{367 \times \eta} \quad (\text{V.29})$$

Avec :

P : La puissance consommée par la pompe en Kw.

Q : Débit en (m³/h)

HMT : Hauteur manométrique totale.

η : Rendement donné par le constructeur au point de fonctionnement (0.8, 0.9).

$$P = \frac{1 \times 90.186}{367 \times 0.85}$$

$$P = 0.289Kw$$

$$E = P \times N_h$$

$$E = 0.289 \times 6.82$$

$$E = 1.97 KwH$$

Les tarifs de l'électricité et du gaz applicable depuis 1^{er} janvier 2016 montrent que le prix de 1KwH consommée est de 5.48 DA (SONALGAZ), donc le prix de 1m³ d'eau pompé est 10.79 DA.

V.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'une étude de dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque pour irriguer un hectare de palmier dattier dans la ville de Hassi Ben Abdellah.

Selon l'étude, les résultats montrent que la puissance crête du générateur photovoltaïque est de 10000W, se constitue de 28 modules photovoltaïques en silicium mono cristallin connecté en série pour produire une puissance maximal égal à 360 W de 3 branchement 11 modules en série et 3 modules en parallèle.

Nous concluons que le pompage solaire photovoltaïque est plus économique par rapport au pompage normal à long terme.

Conclusion générale

Après avoir fait toutes ces recherches, études et calculs, on a déduit que l'utilisation des énergies renouvelables est l'avenir en matière d'économie et d'agriculture, car il est clair que l'utilisation d'énergie tel que la photovoltaïque, permet d'optimiser les gains économiques et temporelles à long terme.

Mais, l'analyse des générateurs photovoltaïques, nous aide à comprendre le fonctionnement de ces derniers selon l'éclairement et la température et leurs résultats sur les caractéristiques électriques, donc sur leur rendement.

La conception d'un système de pompage photovoltaïque, nécessite une connaissance accrue, des différentes parties de ce système et du plan de rayonnement de l'emplacement à étudier. L'étude des parties qui constituent ce système PV, pour une micro irrigation a permis de mieux choisir et de mieux dimensionner ces parties.

L'eau requise pour l'irrigation dépend du type de climat, des plantes et de la manière à irriguer choisi, la rationalisation de l'eau, est la meilleure solution, dans notre cas, donc la micro irrigation permet d'économiser 50% à 70%, en eau par rapport à l'irrigation gravitaire, pour améliorer la qualité des dattes.

Les besoins en eau, peuvent être calculés, mais pour éviter les pénuries en cas de mauvais temps, le dimensionnement des capacités de stockage d'eau est approximatif. Le calcul de la taille du générateur, ne peut pas être exacte, à cause des conditions incertaines du rayonnement solaire et du calcul difficile des besoins d'eau nécessaires, donc, mieux vaut, bien choisir la pompe et le calibre du générateur.

Le choix des panneaux solaire et de la pompe dépend de plusieurs éléments essentiels, le débit journalier en eau, la hauteur manométrique totale, la tension, la puissance nécessaire pour le pompage Etc.

Le dimensionnement, nécessite une bonne connaissance du climat et de la géographie de la zone en question, récupérer le plus d'énergie solaire possible, en améliorant la capture des panneaux solaire, pour bien utilisé l'énergie solaire, il faut une bonne installation, une orientation adéquate des panneaux solaires et un bon dimensionnement du système de pompage.

Stocker l'eau dans des réservoirs hydrauliques, au lieu de stocker l'électricité dans des batteries est la meilleure manière de baisser et simplifier les couts, d'une part et d'autre part afin de protéger l'environnement des émanations nocives des batteries, ce système de pompage est construit pour une alimentation en eau dit, « au fil du soleil ».

Références bibliographiques

1. J. Jamin, J. Poussin. Article introductif Les agricultures irriguées face à de nouveaux défis,” Cah. Agric., vol. 20, pp. 10–15, 2011.
2. P. Favreau, D. Sainte-Beuve. ‘Les besoins en eau des cultures en corse,’ vol. d, p. 134, 2002.
3. H. C. Ouled, M. BMS Messahel. Efficience des systèmes d’irrigation en Algérie,” vol. 78, pp. 61–78, 2005.
4. R. O. E. N. Cours EAENSP and AUNNum. Science et changements planétaires / Sécheresse,” pp. 15–19, 2009.
5. O. Aubriot. Comment « lire » un système d’irrigation ? Un angle d’approche pour l’étude de systèmes irrigués traditionnels, illustré de cas pris au Népal,” Territ. En Mutat., vol. 7, no. May, pp. 37–50, 2000.
6. I. Aouata. Ecole Nationale Supérieure D’Hydraulique- Arbaoui Abdallah-Département D’Irrigation Et Drainage, 2015.
7. C. Brouwer. Gestion des eaux en irrigation Méthodes d’irrigation, Institut international pour l’amélioration et la mise en valeur des terres, Manuel de formation n°5,1990.
8. A. Prior, R. Oad, K-D. Kinzli. Agricultural Water Conservation in the High Plains Aquifer and Arikaree River Basin. J Water Resour Prot 2013; 05: 747–759.
9. J. Chossat. Les divers modes d’irrigation de la source à la parcelle, Cours.
10. B. Bendjabeur. L’irrigation traditionnelle Les Systèmes d ’irrigation,” article, p. 118.
11. L. Ouedraogo. Conception et dimensionnement d ’ un système d ’ irrigation de type semi-californien de 40ha à Kouforpissiga : République du Bénin, p. 142, Mémoire de Master, Institut International d’Ingénierie de l’Eau et de l’Environnement République du Bénin, Janvier 2017.
12. S. Ahuja. Chemistry and water - 1st edition, the science behind sustaining the world’s most crucial resource. Elsevier, 2016;
13. J. Louis Jean. Mémoire Online - Etude de faisabilité de l’aménagement hydro agricole de la plaine de Lhomond dans la 11ème section communale d’Aquin _ zone frangipane -. 2008.
14. J. Chossat. Les divers modes d ’ irrigation de la source à la parcelle, livre, 2018.
15. Maurer, Jean-Luc. Irrigation, riziculture et gestion de l’eau en Indonésie. La modernisation des traditions agro hydrauliques à Java et Bali / Irrigation, rice cultivation and water management in Indonesia. The modernisation of agro-hydraulic traditions in Java and Bali. Géocarrefour 1990; 65: 27–37.

Références bibliographiques

16. M. L. Louazene. Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla, Thèse de Doctorat en Sciences, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Octobre 2015.
17. Energie solaire : définition et différents types d'exploitation - Opéra Energie. <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (3 April 2023, date last accessed).
18. K. Helali. Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, Mémoire de magister Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Juin 2012.
19. A. Nechmi. Aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable, Mémoire de master école national supérieur d'hydraulique Arbaoui Abdelah, Mai 2015.
20. M. Belaid, S. Lalouni. Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A. MIRA-BEJAIA. 2014.
21. H. Hadjou Smir, A. Ghogueur. Etude technico-économique de l'irrigation par pompage solaire photovoltaïque, d'une palmeraie de palmiers : Etude de cas, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Juin 2018.
22. I. Bendjamâa. Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque. Mémoire de magister Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2012.
23. M. Addou, A. Beddiaf. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, Juin 2016.
24. I. Sayah. Étude d'une installation de pompage solaire photovoltaïque destiné à l'irrigation, Mémoire de master, Université de Mohamed Khider-Biskra, juin 2020.
25. I. Bessoltane, I. Doudoua. Etude technico-économique de système de pompage photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem, Université abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem, juin 2019.
26. T. Bouguerra. Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continue et en alternatif, Thèse de Magister, Université Mentouri-Constantine1, Juin 2014.
27. W. Abbassi, S. Boulal. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site Adrar, Mémoire de Master Université Ahmed Draïa-Adrar Mai 2017.
28. Z. Ben Khelifa, W. Derouiche. Etude de l'irrigation d'un champ agricole par le pompage photovoltaïque dans la région de Hassi Ben Abdallah Ouargla, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Mai 2017.
29. Guide d'information sur l'énergie solaire photovoltaïque. <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/> (4 April 2023, date last accessed).
30. M.Y. Aliouat. Etude structurale, mécanique et optique des matériaux polymères pour le photovoltaïque étirable, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, Novembre 2020.

Références bibliographiques

31. Définir le raccordement au réseau de distribution - Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaique/definir-le-raccordement-au-reseau-de-distribution/> (4 April 2023, date last accessed).
32. La Flex Yourte - Accueil. <http://www.flexyourte.com/> (4 April 2023, date last accessed).
33. M. Ait Atmane, K. Farhi. Etude et dimensionnement des systèmes de pompage solaire. Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi. Juin 2011.
34. M. I. Nouadja, A. C. Amira. Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque pour un système de pompage dans la région de Ouargla, Mémoire de Master Académique Université Kasdi Merbah-Ouargla, Septembre 2020.
35. F.YOUSEFI. Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque appliqué à un site saharien (région d'Adrar), Mémoire de Master Université d'Adrar, Mai 2018.
36. M.L. Degla, B. Ben Ahmed. Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Kasdi Merbah-ouargla, Mai 2017.
37. T. Bouguerra. Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continue et en alternatif, Thèse de Magister, Université Mentouri-Constantine1, Juin 2014.
38. J. Royer, T. Djako, E. Schiller, B. Sada SY. Le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'ottava-Canada.
39. M.L. Louazene. Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla, Thèse de Magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Juin 2008.
40. Z.Alili, S.A .Boudehane. Étude et simulation d'un pompage solaire au fil du soleil, Mémoire de Master Université Mohamed Khider-Biskra, 2020.
41. I. Lafia Seidou. Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de Adjakpata, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie-Ouagadougou 01-Burkina Faso, Juin 2017. .
42. Aide mémoire de mécanique des fluides : formules et équations définitions et terminologie – Bibliothèque de l'ESTI. <https://esti-annaba.dz/bib/aide-memoire-de-mecanique-des-fluides-formules-et-equations-definitions-et-terminologie/> (29 April 2023, date last accessed).
43. Modules de perte charge singulière, coude, vannes, branchement, hydraulique, pression. https://www.thermexcel.com/french/ressourc/pdc_singu.htm (4 April 2023, date last accessed).
44. R. Khezzer. Optimisation de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique, Thèse de Doctorat, Université El Hadj Lakhdar-Batna 1, Février 2017.
45. Université Kasdi Merbah Ouargla - Accueil. <https://www.univ-ouargla.dz/index.php/fr/> (29 April 2023, date last accessed).
46. M. Rouici. Le système d'irrigation pratiqué dans les palmerais de Sidi Okba ; Description et analyse d'efficacité, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.

Références bibliographiques

47. K. Anissa, S. Kabore. Détermination des coefficients cultureux des paramètres de croissance du *Chrysanthellum Indicum* Var. *Afroamericanum* B.L. Turner au Burkina-Faso, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie-Ouagadougou 01-Burkina Faso, Septembre 2018.
48. H. Dellile, A. Smahi. Détermination la dose d'arrosage du palmier dattier : cas del : exploitation de l'université d'Ouargla. Mémoire de master Académique. Université de Kasdi Merbah.Oaurgla, Juin 2018.
49. A. Mihoub, S. Helimi, A Halitimi. Appréciation d'une méthode pour l'estimation des besoins en eau d'une culture cultivée dans un milieu salin. Centre de la recherche Scientifique des régions arides (C.R.S.T.R.A). Ouargla.
50. Expert de l'autonomie solaire : kit solaire, panneau photovoltaïque, batterie et régulateur * SOLARIS-STORE. <https://www.solaris-store.com/> (4 April 2023, date last accessed).

Annexe A : Catalogue de la pompe

Pompe immergée LORENTZ PSk2-15 C-SJ17-12

Gamme de système

Hauteur manométrique : max 100 m

Débit : max 39 m³/h

Données techniques :

Contrôleur PSk2-15 :

- Contrôleur pour les pompes solaires à haut rendement
- Soutien de puissance hybride (solaire/réseau/générateur) grâce à la SmartSolution de LORENTZ
- Entrées pour compteur d'eau, capteur de pression, interrupteurs digital
- Configuration simple avec l'application PumpScanner de LORENTZ pour Android TM
- Enregistrement de données et surveillance du système intégré
- Application intégrée pour pression constante, débit constant et quantité quotidienne
- Recherche de point de puissance maximale (MPPT) intégrée



Puissance	max 15 kW
Tension d'entrée	max 850 V
Optimal Vmp	>575 V
Tension nominale	530 V
Intensité du moteur	max 24 A
Efficacité	98 %
Température ambiante	-30-50 °C
Classe de protection	IP66

Annexes

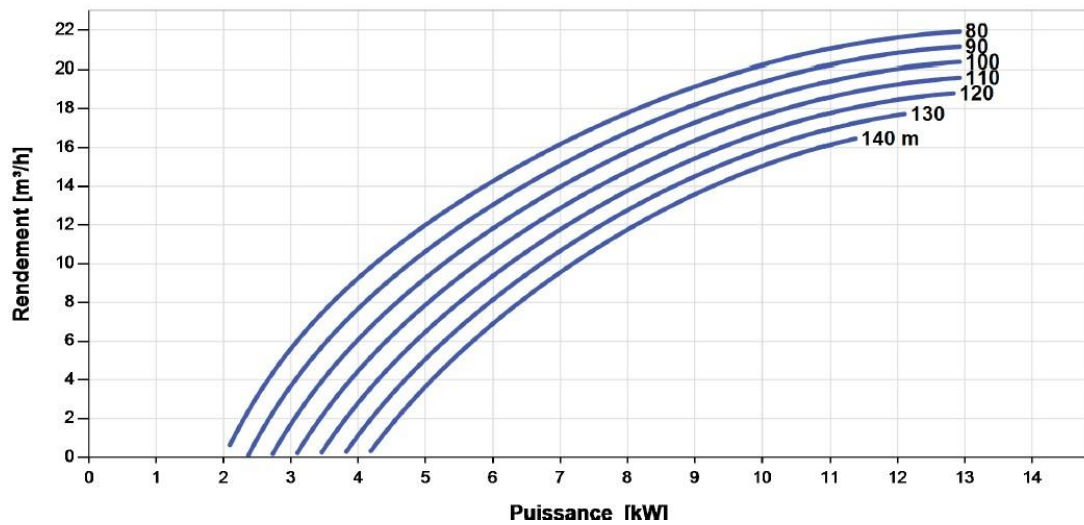
Moteur AC DRIVE SUB 6'' 11 Kw :

- Moteur triphasé à courant alternatif et à haut rendement
- Fréquence : 25...50HZ
- Matériel de haut qualité, acier inoxydable : AISI 304
- Moteur sans électronique à l'intérieur

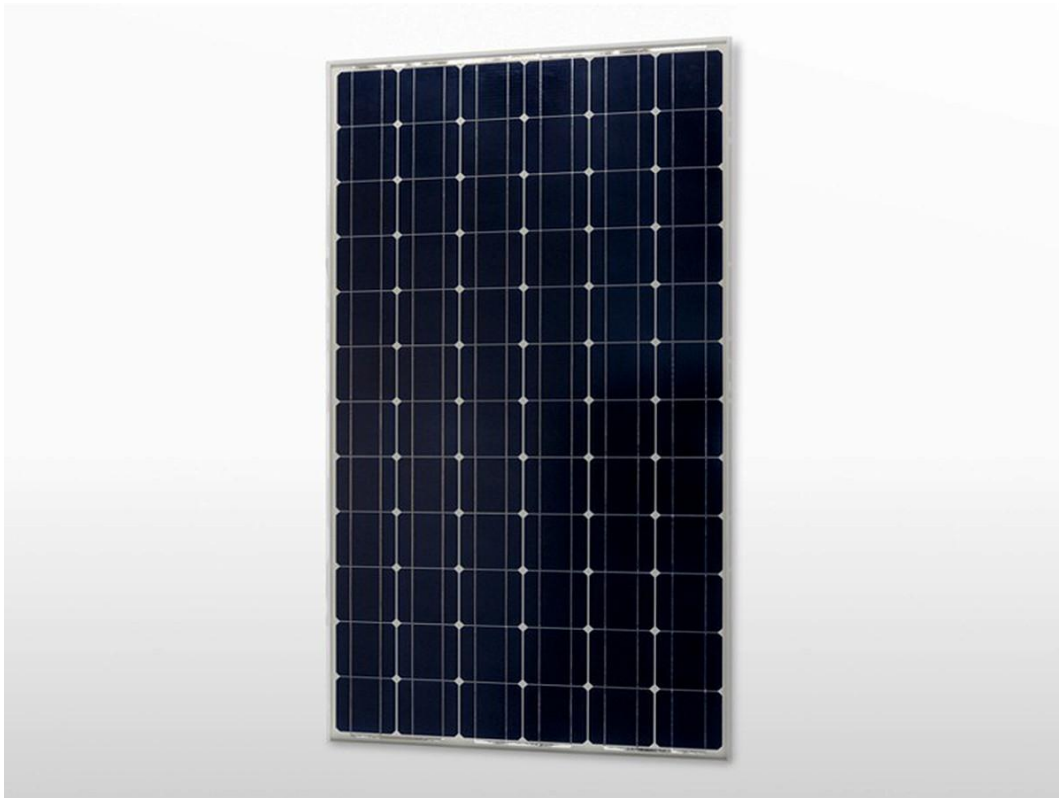
Vitesse du moteur	1400-2850 rpm
Facteur de puissance	0.87
Classe d'insolation	F
Classe de protection	IP68
Submerssion	max 15 0m

Graphique de la pompe

Vmp* > 575 V



Annexe B : Panneau solaire mono cristallin VICTRON 360Wc - 24V



Caractéristiques techniques :

Description de module	1956*992*40 mm
Poids	22 Kg
Puissance nominale P_{mpp}	360 V
Tension à puissance max V_{mpp}	38.4 V
Courant à puissance max I_{mpp}	9.38 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	47.4 V
Courant de court-circuit I_{sc}	10.24 A

Annexes

Caractéristiques électriques selon STC (valeurs aux conditions de test standardisées (STC) irradiation 1000W/m², température de cellule 25°C, masse d'air 1.5).

Puissance nominale (tolérance+/-3%)	360W
Type de cellules	Monocristal
Nombre des cellules couplées en série	72
Tension maximale système	1000 V
Coefficient de température de P_{mp} (%)	-0.45/°C
Coefficient de température de V_{oc} (%)	-0.35/°C
Coefficient de température de I_{sc} (%)	+0.04/°C
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C
Capacité de charge maximale en surface	200 kg/m ²
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7 ,53 g
Boite de raccordement	PV-JB002
Type de connecteur	MC4
Longueur des câbles	900 mm
Tolérance de puissance	+/-3%
Cadre	Aluminium
Garantie de produit	5 ans
Garantie sur les performances électriques	10 ans à 90% + 25 ans 80% de la puissance minimale

Annexe C : Tableau de COOLBROUK WHITE

VITESSE MOYENNE EN METRES	DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,100 m			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,125 m			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,150 m			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,200 m		
	Section de la conduite 0,007854 m ²			Section de la conduite 0,012272 m ²			Section de la conduite 0,0176725 m ²			Section de la conduite 0,031416 m ²		
	Charges par mètre de longueur de conduite		Débit en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite		Débit en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite		Débit en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite		Débit en litres/sec.
	k=10 ⁻⁴	k=2.10 ⁻³		k=10 ⁻⁴	k=2.10 ⁻³		k=10 ⁻⁴	k=2.10 ⁻³		k=10 ⁻⁴	k=2.10 ⁻³	
0,01					0,122 7				0,176 7		0,314 2	
0,05					0,613 6				0,883 6		1,570 8	
0,10	0,000 191		0,785 4	0,000 144	1,227 2	0,000 034	0,000 163	0,000 114	1,767 1	0,000 024	0,000 030	
0,15	0,000 388	0,000 604	1,578 1	0,000 291	2,454 4	0,000 232	0,000 352	0,000 232	3,534 3	0,000 079	0,000 110	
0,20	0,000 643	0,001 054	2,356 2	0,000 486	3,681 6	0,000 387	0,000 612	0,000 387	5,301 4	0,000 162	0,000 238	
0,25	0,000 956	0,001 622	3,534 3	0,000 726	5,522 4	0,000 578	0,000 941	0,000 578	7,952 2	0,000 270	0,000 413	
0,30	0,001 335	0,002 312	4,712 4	0,001 009	7,952 2	0,000 801	0,001 336	0,000 801	11,486 5	0,000 400	0,000 636	
0,35	0,001 763	0,003 120	5,890 5	0,001 330	10,411 8	0,001 059	0,001 810	0,001 059	15,253 6	0,000 557	0,000 903	
0,40	0,002 248	0,004 060	7,068 6	0,001 701	13,656 0	0,001 351	0,002 347	0,001 351	19,438 6	0,000 736	0,001 217	
0,45	0,002 786	0,005 111	8,246 7	0,002 104	17,179 4	0,001 674	0,002 948	0,001 674	24,272 9	0,000 940	0,001 581	
0,50	0,003 370	0,006 281	9,424 8	0,002 548	20,862 4	0,002 031	0,003 622	0,002 031	30,041 5	0,001 169	0,001 989	
0,55	0,004 009	0,007 584	10,602 9	0,003 037	24,545 8	0,002 421	0,004 374	0,002 421	36,816 0	0,001 421	0,002 443	
0,60	0,004 707	0,009 006	11,781 0	0,003 560	28,624 8	0,002 842	0,005 187	0,002 842	44,602 9	0,001 692	0,002 945	
0,65	0,005 447	0,010 543	12,959 1	0,004 120	33,019 2	0,003 293	0,006 070	0,003 293	53,424 8	0,001 986	0,003 491	
0,70	0,006 245	0,012 215	14,137 2	0,004 726	38,131 2	0,003 777	0,007 028	0,003 777	63,486 6	0,002 298	0,004 080	
0,75	0,007 090	0,014 000	15,315 3	0,005 369	43,992 0	0,004 289	0,008 054	0,004 289	75,000 0	0,002 642	0,004 734	
0,80	0,007 985	0,015 912	16,493 4	0,006 059	50,504 0	0,004 834	0,009 155	0,004 834	87,566 4	0,002 996	0,005 433	
0,85	0,008 931	0,017 951	17,671 5	0,006 765	57,872 0	0,005 411	0,010 329	0,005 411	101,196 0	0,003 376	0,006 181	
0,90	0,009 930	0,020 108	18,849 6	0,007 531	66,000 0	0,006 017	0,011 572	0,006 017	116,000 0	0,003 784	0,006 979	
			20,027 7		74,928 0				132,000 0	0,004 212	0,007 824	
			21,205 8		84,672 0				149,000 0		28,274 4	

0,95	0,010 980	0,022 402	7,461 3	0,008 332	0,016 567	11,658 4	0,006 652	0,012 883	16,787 9	0,004 658	0,008 717	29,845 2
1,00	0,012 080	0,024 822	7,854 0	0,009 166	0,018 349	12,272 0	0,007 316	0,014 268	17,671 5	0,005 122	0,009 659	31,416 0
1,05	0,013 233	0,027 365	8,246 7	0,010 047	0,020 228	12,885 6	0,008 009	0,015 722	18,555 0	0,005 619	0,010 648	32,986 8
1,10	0,014 431	0,030 033	8,639 4	0,010 962	0,022 201	13,499 2	0,008 732	0,017 247	19,438 6	0,006 139	0,011 686	34,557 6
1,15	0,015 673	0,032 829	9,032 1	0,011 913	0,024 268	14,112 8	0,009 487	0,018 852	20,322 2	0,006 680	0,012 774	36,128 4
1,20	0,016 955	0,035 746	9,424 8	0,012 901	0,026 424	14,726 4	0,010 271	0,020 527	21,205 8	0,007 241	0,013 909	37,699 2
1,25	0,018 301	0,038 785	9,817 5	0,013 921	0,028 670	15,340 0	0,011 086	0,022 273	22,089 3	0,007 821	0,015 092	39,270 0
1,30	0,019 692	0,041 950	10,210 2	0,014 988	0,031 010	15,953 6	0,011 933	0,024 091	22,972 9	0,008 424	0,016 324	40,840 8
1,35	0,021 142	0,045 237	10,602 9	0,016 089	0,033 440	16,567 2	0,012 813	0,025 978	23,856 5	0,009 047	0,017 603	42,411 6
1,40	0,022 637	0,048 651	10,995 6	0,017 231	0,035 964	17,180 8	0,013 726	0,027 939	24,740 1	0,009 695	0,018 931	43,982 4
1,45	0,024 197	0,052 187	11,388 3	0,018 406	0,038 578	17,794 4	0,014 667	0,029 970	25,623 7	0,010 362	0,020 307	45,553 2
1,50	0,025 803	0,055 849	11,781 0	0,019 615	0,041 285	18,408 0	0,015 642	0,032 072	26,507 2	0,011 049	0,021 737	47,124 0
1,55	0,027 456	0,059 638	12,173 7	0,020 857	0,044 086	19,021 6	0,016 646	0,034 248	27,390 8	0,011 756	0,023 206	48,694 8
1,60	0,029 149	0,063 544	12,566 4	0,022 140	0,046 973	19,635 2	0,017 684	0,036 491	28,274 4	0,012 480	0,024 726	50,265 6
1,65	0,030 890	0,067 581	12,959 1	0,023 458	0,049 957	20,248 8	0,018 752	0,038 809	29,158 0	0,013 232	0,026 297	51,836 4
1,70	0,032 671	0,071 735	13,351 8	0,024 805	0,053 028	20,862 4	0,019 846	0,041 195	30,041 5	0,014 001	0,027 913	53,407 2
1,75	0,034 514	0,076 021	13,744 5	0,026 200	0,056 196	21,476 0	0,020 970	0,043 656	30,925 1	0,014 790	0,029 581	54,978 0
1,80	0,036 397	0,080 423	14,137 2	0,027 625	0,059 450	22,089 6	0,022 129	0,046 184	31,808 7	0,015 597	0,031 294	56,548 8
1,85	0,038 324	0,084 952	14,529 9	0,029 097	0,062 798	22,703 2	0,023 317	0,048 785	32,692 2	0,016 424	0,033 056	58,119 6
1,90	0,040 296	0,089 608	14,922 6	0,030 588	0,066 240	23,316 8	0,024 533	0,051 459	33,575 8	0,017 268	0,034 868	59,690 4
1,95	0,042 347	0,094 385	15,315 3	0,032 126	0,069 772	23,930 4	0,025 777	0,054 202	34,459 4	0,018 141	0,036 727	61,261 2
2,00	0,044 446	0,099 290	15,708 1	0,033 714	0,073 397	24,544 0	0,027 062	0,057 018	35,343 0	0,019 032	0,038 635	62,832 0
2,05	0,046 589	0,104 315	16,100 7	0,035 344	0,077 112	25,157 6	0,028 374	0,059 905	36,226 5	0,019 942	0,040 591	64,402 8
2,10	0,048 777	0,109 468	16,493 4	0,036 990	0,080 921	25,771 2	0,029 716	0,062 863	37,110 1	0,020 882	0,042 596	65,973 6
2,15	0,051 010	0,114 742	16,886 1	0,038 678	0,084 820	26,384 8	0,031 085	0,065 892	37,993 7	0,021 841	0,044 648	67,544 4
2,20	0,053 285	0,120 138	17,278 8	0,040 437	0,088 808	26,998 4	0,032 497	0,068 991	38,877 2	0,022 831	0,046 748	69,115 2
2,25	0,055 608	0,125 665	17,671 5	0,042 236	0,092 894	27,612 0	0,033 941	0,072 165	39,760 8	0,023 843	0,048 899	70,686 0
2,30	0,057 970	0,131 310	18,064 2	0,044 068	0,097 067	28,225 6	0,035 411	0,075 406	40,644 4	0,024 873	0,051 095	72,256 8
2,35	0,060 377	0,137 081	18,456 9	0,045 960	0,101 333	28,839 2	0,036 911	0,078 720	41,527 9	0,025 924	0,053 340	73,827 6
2,40	0,062 828	0,142 978	18,849 6	0,047 890	0,105 692	29,452 8	0,038 441	0,082 107	42,411 5	0,026 981	0,055 635	75,398 4
2,45	0,065 320	0,148 998	19,242 3	0,049 858	0,110 142	30,066 4	0,039 998	0,085 564	43,295 1	0,028 071	0,057 978	76,969 2
2,50	0,065 853	0,155 139	19,635 0	0,051 862	0,114 682	30,680 0	0,041 583	0,089 090	44,178 7	0,029 180	0,060 367	78,540 0
3,00	0,096 333	0,223 402	23,562 0	0,073 580	0,165 143	36,816 0	0,059 023	0,128 291	53,014 5	0,041 400	0,086 929	94,248 0
3,50	0,129 559	0,304 073	27,489 0	0,098 802	0,224 777	42,952 0	0,079 296	0,174 618	61,850 3	0,055 757	0,118 320	109,956 0
4,00	0,167 589	0,397 158	31,416 0	0,128 004	0,293 587	49,088 0	0,102 483	0,228 073	70,686 0	0,072 051	0,154 541	125,664 0