



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued
Faculté de la technologie
Département de Génie mécanique



N° d'ordre :

N° serie :

Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD

En

Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Présenté par

Brik Mohamed

Thème

**Optimisation et conception d'un pivot
d'irrigation solaire**

Devant le jury :

Dr. Meneceur Redha	MCA Université d'El Oued	Président
Pr. Bekkouche Sidi Mohammed El Amine	URAER, CDER Ghardaïa	Examineur
Pr. Bouchakour Abdelhak	URAER, CDER Ghardaïa	Examineur
Dr. Boulifa Mohammed Iliasse	MCA Université d'El Oued	Examineur
Dr. Guerrah Ayoub	MCA Laboratoire LEVRES SPA Polytrav, Mascara.	Encadreur
Pr. Atia Abdelmalek	Université d'El Oued	Co-encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma famille aimante, dont le soutien et les encouragements inébranlables ont été les piliers de ma force tout au long de ce parcours.

À mes parents, qui m'ont inculqué l'amour de l'apprentissage et l'importance de la persévérance.

À mon conjoint, dont la patience et la compréhension m'ont permis de poursuivre ma passion. Et à mes enfants, qui m'apportent joie et inspiration au quotidien.

À mes amis et mentors, merci pour vos précieux conseils et encouragements tout au long de ce parcours académique. Vos idées ont enrichi ma compréhension et façonné le résultat de ce travail.

Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation, et je vous suis reconnaissante pour les innombrables sacrifices que vous avez faits pour me voir réussir. Cette réussite est autant la vôtre que la mienne. Merci d'être ma source constante d'inspiration et d'être la base sur laquelle mes rêves ont été construits.

Avec amour et gratitude,

Mohamed

Remerciements

J'exprime ma gratitude, avant tout, ALLAH Tout Puissant pour m'avoir accordé le courage, la patience et la bonne santé tout au long de ces années d'études. C'est grâce à ses bénédictions que ce travail a pu voir le jour.

J'exprime ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, Dr. Ayoub Guerrah, pour ses conseils inestimables, son soutien indéfectible et son expertise. Leur mentorat a joué un rôle déterminant dans l'élaboration de la trajectoire de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon Co-encadreur Pr. Abdelmalek Atia, pour ses contributions perspicaces et ses commentaires constructifs qui ont grandement enrichi le contenu et la qualité de ce travail.

Je remercie SPA AMAIS ALGÉRIE et SARL AGRISUN pour leur coopération dans le cadre du projet de pivot solaire. Leur volonté de partager les informations sur le projet en tant que cas appliqué a été inestimable pour ma recherche, me permettant de bénéficier d'aperçus du monde réel.

Un grand merci aux membres du jury, pour leur temps, leur expertise et leur évaluation réfléchie de cette thèse. Leurs commentaires ont été essentiels pour affiner et renforcer les arguments présentés.

Je mentionne le mérite du Professeur Hamidat Abdel Rahman, que Dieu lui fasse miséricorde, ancien Président du Conseil Scientifique du CDER (Bouzareah, Alger), pour sa contribution à nos côtés dans nos interventions dans le premier et deuxièmes conférences internationales.

Une reconnaissance particulière est réservée aux agriculteurs qui ont généreusement partagé leur temps et leurs idées, apportant des données et des perspectives précieuses à cette recherche. Votre collaboration est profondément appréciée.

En conclusion, j'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont joué un rôle, grand ou petit, dans la réalisation de cette thèse. Votre soutien collectif a été indispensable et je vous en remercie sincèrement.

Résumé

Ces dernières années, le sud de l'Algérie, en particulier la région d'El Oued, a connu un essor agricole remarquable. Cependant, l'essor de l'activité agricole s'est accompagné de défis liés aux pratiques d'irrigation traditionnelles, qui ne permettent souvent pas d'atteindre les objectifs de durabilité. Cette thèse répond à la nécessité d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie dans l'agriculture en se concentrant sur l'optimisation et la conception d'un système d'irrigation à pivot alimenté par l'énergie solaire. Les premières investigations révèlent des inefficacités significatives dans la planification de l'irrigation traditionnelle, conduisant à une surconsommation d'eau et à une utilisation élevée d'énergie. L'étude progresse selon une approche en deux phases. Tout d'abord, elle effectue une évaluation complète sur le terrain de six systèmes de pivot centraux à Ouargla et El Oued, en utilisant le modèle CROPWAT pour analyser les besoins en eau et l'analyseur d'énergie électrique du réseau triphasé CHAUVIN ARNOUX (C. A.8332B) pour analyser l'efficacité de l'utilisation d'énergie. La deuxième phase s'oriente vers le dimensionnement et l'évaluation des systèmes photovoltaïque (PV) pour alimenter chaque type de pivot. Les résultats mettent en évidence la disparité entre les volumes d'eau appliqués et les volumes d'eau optimaux, causant une faible efficacité d'utilisation de l'eau. Les pivots modernes ont été les équipements les plus efficaces avec 1.1 kW/ha en termes de puissance installée, mais elle est environ quatre fois plus élevée dans le cas des mini pivots. Ainsi que la plage de la consommation spécifique de l'eau (0.227-0.326 kWh/m³) des pivots était près des activités d'irrigation à faible consommation. Concernant la simulation des systèmes PV autonomes, les résultats ont montré que la taille du système PV dans le cas d'irrigation conventionnelle était respectivement plus grande de 190 et 171% pour le pivot moderne et artisanal que dans le cas de planification CROPWAT.

Mots clés : Optimisation, pivot d'irrigation, photovoltaïque, dimensionnement, système de pompage

ملخص

في السنوات الأخيرة، شهد جنوب الجزائر، وخاصة منطقة الوادي، نمواً فلاحياً ملحوظاً. ومع ذلك، فإن صعود النشاط الزراعي رافقه تحديات تتعلق بممارسات الري التقليدية، والتي غالباً ما تفشل في تحقيق أهداف الاستدامة. تتناول هذه الأطروحة الحاجة إلى تحسين كفاءة استخدام المياه والطاقة في الزراعة من خلال التركيز على تحسين وتصميم نظام الري المحوري الذي يعمل بالطاقة الشمسية. وتكشف التحقيقات الأولية عن أوجه قصور كبيرة في تخطيط الري التقليدي، مما يؤدي إلى الإفراط في استهلاك المياه وارتفاع استخدام الطاقة. تتقدم الدراسة باستخدام نهج من مرحلتين. أولاً، يقوم بإجراء تقييم ميداني شامل لستة أنظمة محورية مركزية في ورقلة والواد، وذلك باستخدام نموذج CROPWAT لتحليل الاحتياجات المائية ومحلل الطاقة الكهربائية لشبكة ثلاثي الطور لتحليل كفاءة استخدام الطاقة. تركز المرحلة الثانية على تحديد حجم الأنظمة الكهروضوئية وتقييمها لتشغيل كل نوع من أنواع المحاور. تسلط النتائج الضوء على التفاوت بين أحجام المياه المطبقة وأحجام المياه المثالية، مما يتسبب في انخفاض كفاءة استخدام المياه. تعد أنظمة الري المحوري الحديثة هي المعدات الأكثر كفاءة حيث تبلغ 1.1 كيلوات/هكتار من حيث الطاقة المركبة، ولكنها أعلى بحوالي أربعة أضعاف في حالة أنظمة الري المحورية الصغيرة. وكذلك كان مدى استهلاك المياه النوعي (0.227-0.326 كيلوات ساعة/م³) للمحاور قريباً من أنشطة الري ذات الاستهلاك المنخفض. وفيما يتعلق بمحاكاة الأنظمة الكهروضوئية المستقلة، أظهرت النتائج أن حجم نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية في حالة الري التقليدي كان أكبر بنسبة 190 و171٪ على التوالي بالنسبة للمحور الحديث والحرفي منه في حالة تخطيط CROPWAT.

الكلمات الدالة: التحسين، محاور الري، الخلايا الكهروضوئية، التحجيم، أنظمة الضخ

Abstract:

In recent years, southern Algeria, and in particular the El Oued region, has experienced a remarkable agricultural boom. However, the boom in agricultural activity has been accompanied by challenges related to traditional irrigation practices, which often fail to meet sustainability objectives. This thesis addresses the need to improve water and energy use efficiency in agriculture by focusing on the optimization and design of a solar-powered pivot irrigation system. Initial investigations reveal significant inefficiencies in conventional irrigation scheduling, leading to over-consumption of water and high energy use. The study follows a two-phase approach. First, it carries out a comprehensive field evaluation of six central pivot systems in Ouargla and El Oued, using the CROPWAT model to analyze water requirements and the three-phase network electrical energy analyzer to analyze energy use efficiency. The second phase focuses on the sizing and evaluation of PV systems to power each type of pivot. The results highlighted the disparity between applied and optimum water volumes, causing low water use efficiency. Modern pivots were the most efficient equipment at 1.1 kW/ha in terms of installed power, but this was around four times higher in the case of mini pivots. And the range of specific water consumption (0.227-.326 kWh/m³) of the pivots was close to low-consumption irrigation activities. Concerning the simulation of stand-alone PV systems, the results showed that the size of the solar PV system in the conventional irrigation case was respectively 190% and 171% larger for the modern and artisanal pivot than in the CROPWAT planning case.

Keywords: Optimization, irrigation pivots, photovoltaics, sizing, pumping systems.

Table de matière

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Résumé.....	iii
ملخص	iv
Abstract:	v
Table de matière.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii
Nomenclature	xiv
Abréviations	xvii
Introduction générale	1
Première Partie : Etat de l'art et littérature.....	4
Chapitre I : Fondements des systèmes de pivot d'irrigation	6
<i>I.1. Introduction.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2. Les éléments structurels</i>	<i>8</i>
<i>I.3. Principes opérationnels</i>	<i>11</i>
<i>I.4. Système de commande et d'entraînement</i>	<i>18</i>
<i>I.5. Le pivot artisanal d'El oued.....</i>	<i>22</i>
<i>I.6. Conclusion.....</i>	<i>25</i>
Chapitre II : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	27
<i>II.1. Introduction</i>	<i>27</i>
<i>II.2. Rayonnement solaire et potentiel énergétique.....</i>	<i>28</i>
<i>II.3. Technologies des cellules photovoltaïques</i>	<i>32</i>
<i>II.4. Les conditions STC et NOCT</i>	<i>39</i>
<i>II.5. Composants des systèmes photovoltaïques.....</i>	<i>40</i>
II.5.1. Panneau (Module) photovoltaïque.....	40
II.5.2. Batteries	43
II.5.3. Onduleurs.....	45
II.5.4. Contrôleurs de charge	46

II.5.5. Traqueurs de puissance maximale	47
II.6. <i>Champ solaire photovoltaïque</i>	48
II.7. <i>Systèmes photovoltaïques et stockage d'énergie</i>	49
II.7.1. Les systèmes photovoltaïques avec batterie	49
II.7.1.1. Système PV autonome	52
II.7.1.2. Système à connexion hybride avec stockage	52
II.7.2. Les systèmes photovoltaïques sans batterie	53
II.8. <i>Conclusion</i>	55
Chapitre III : Conception et dimensionnement des pivots solaires.....	57
III.1. <i>Introduction</i>	57
III.2. <i>Evaluation des besoins en eau</i>	59
III.2.1. Évapotranspiration de référence (ET _o)	59
III.2.2. Besoins en eau des cultures	61
III.3. <i>Dimensionnement du système de pompage solaire PV (SPSPV)</i>	65
III.3.1. Hauteur manométrique totale et exigences énergétiques	65
III.3.2. Considérations de conception pour les systèmes de pompage solaire	67
III.3.3. Composants du (SPSPV).....	70
III.3.4. Conception du SPSPV	73
III.4. <i>Conception du pivot solaire</i>	81
III.5. <i>Efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie</i>	82
III.6. <i>Conclusion</i>	84
Deuxième partie : Expérimentation et dimensionnement.....	85
Chapitre IV : Etude de Terrain et Méthodologie de Recherche	87
IV.1. <i>Introduction</i>	87
IV.2. <i>Zone d'étude et sélection des sites d'irrigation</i>	87
IV.2.1. Caractéristiques des sites.....	89
IV.2.2. Justification des choix	89
IV.3. <i>Collecte et analyse des données</i>	89
IV.3.1. Méthode d'analyse documentaire.....	89
IV.3.2. Entretiens et enquêtes.....	89

IV.3.3. Mesures sur le terrain et collecte de données	90
IV.4. Organigramme de l'approche de recherche.....	96
IV.5. Projet de pivot solaire à Timimoune	97
IV.6. Conclusion	101
Chapitre V : Résultats et discussion.....	103
V.1. Analyse des Besoins en Eau.....	103
V.1.1. Les données climatiques et évapotranspiration	103
V.1.2. Comparaison des besoins en eau réels et optimaux.....	104
V.2. Impact de l'Irrigation sur la Croissance des Cultures.....	107
V.2.1. Étude de cas : blé et pomme de terre	107
V.2.2. Le Rendement des cultures.....	110
V.3. Évaluation de l'Efficacité Énergétique	111
V.3.1. Analyse des besoins énergétiques.....	111
V.3.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau	116
V.4. Dimensionnement de pivot solaire.....	117
V.4.1. Dimensionnement des stations PV autonome	119
V.4.2. Dimensionnement des stations PV mixtes, hybride et autonome.....	121
V.4.2.1. Dimensionnement de la station solaire PV pour le pivot moderne (ANABIB).....	123
V.4.2.2. Dimensionnement de la station solaire PV pour le mini pivot artisanal	125
V.5. Implications Pratiques et Recommandations.....	127
V.5.1. Implications pour l'agriculture locale	127
V.5.2. Perspectives pour des pratiques plus durables.....	128
V.6. Conclusion	128
Conclusion générale et recommandations	130
Références bibliographiques	134
Annexes	145
Annexe A.....	145
Annexe B.....	147

Table de matière

<i>Annexe C</i>	149
<i>Annexe D</i>	155
<i>Annexe E</i>	157
<i>Annexe F</i>	160
<i>Annexe G</i>	168

Liste des figures

Figure I.1. Surfaces circulaires irriguées sous pivots centraux [12]	8
Figure I.2 Schéma de principe d'un pivot [14].....	8
Figure I.3 Vue de l'unité centrale	9
Figure I.4. Canalisation, arroseurs, tours et travées d'un pivot central	10
Figure I.5. Vue de port -à- faux avec pistolet d'extrémité.....	11
Figure I.6 Boîtier de la tour à deux micro-interrupteurs	12
Figure I.7. Schéma du déplacement d'un pivot central d'irrigation [17].....	12
Figure I.8 Exemple de pompes centrifuges horizontales [20]	13
Figure I.9 Pompes centrifuges horizontales aspirant l'eau d'un étang [19].....	14
Figure I.10 Exemple de pompe centrifuge utilisée pour augmenter la pression.....	14
Figure I.11 Système de pompe à turbine vertical [19].....	15
Figure I.12 Exemples de pompes submersibles [19]	15
Figure I.13 Arroseurs d'irrigation à basse pression	17
Figure I.14 Vue des composants clés du système d'application chimique indépendant utilisant des mini-asperseurs [22]	18
Figure I.15. Panneau de commande pour un système de pivot central.....	19
Figure I.16. Moteur électrique accouplé à un réducteur de vitesse monté sur tour mobile	20
Figure I.17. Roue d'une tour mobile montée sur un réducteur de vitesse	21
Figure I.18. Composantes du pivot artisanal [24].....	23
Figure I.19 Moteur électrique et réducteur	24
Figure I.20 L'armoire de commande de deux pivots et un groupe motopompe	25
Figure II.1 Graphique de la consommation mondiale d'énergie prévue [26]	27
Figure II.2 La capacité solaire (PV) installée dans différentes régions du monde entre 2010 et 2020 [29].....	28
Figure II.3. Analyse spectrale du rayonnement solaire [32]	30
Figure II.4. Représentation schématique de l'irradiation directe, diffuse et réfléchié par le sol [33].....	31
Figure II.5 Angle de zénith et Masse d'air (AM)	32
Figure II.6. Structure et fonctionnement des cellules solaires [36]	33
Figure II.7. Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs [38]	34
Figure II.8 La classification des technologies de cellules solaires PV [40].....	35
Figure II.9 . Modèle à une seule diode d'une cellule solaire PV [38].....	36

Figure II.10. Courbe caractéristique I-V d'une cellule PV	37
Figure II.11 Influence de l'irradiation et de la température des cellules sur les caractéristiques des cellules PV [44]	39
Figure II.12. Connexion en parallèle et en série de deux cellules solaires identiques. (a) Connexion en parallèle. (b) Connexion en série [44].	39
Figure II.13 Les courbes I-V et P-V d'un module photovoltaïque [45].....	41
Figure II.14 Le facteur de remplissage, défini comme le rapport des surfaces des deux triangles [45]	43
Figure II.15. Schéma de principe d'une batterie [47].....	44
Figure II.16. Schéma de principe du contrôleur types shunt et série [47]	46
Figure II.17 Générateur de cellules composé de branches parallèles MP, chacune avec des modules MS en série [47]	48
Figure II.18. Système typique d'énergie solaire photovoltaïque [36]	49
Figure II.19. Courbe I-V d'un module de 50 Wc et d'une batterie de 12 volts [32]	51
Figure II.21. Vue schématique d'un système PV hybride [52]	53
Figure II.22 Point de fonctionnement d'un champ PV couplé à a) une batterie, b) une charge résistive [32].....	54
Figure II.23 Schéma d'un système PV à couplage direct.....	54
Figure II.24. Vue schématique d'un système solaire PV de 1 MWc connecté à un réseau de distribution d'électricité.....	55
Figure III.1 La répartition de l'évapotranspiration entre évaporation et transpiration au cours de la période de croissance d'une grande culture annuelle [62].....	59
Figure III.2 Evapotranspiration de référence (ET _o), de la culture dans des conditions standard (ET _c) et de la culture dans des conditions non standard (ET _r) [64]	62
Figure III.3 L'interface du programme CROPWAT 8.0 [67]	63
Figure III.4 Principales entrées et sorties du modèle CROPWAT 8.0	64
Figure III.5. Les variations du niveau de l'eau : profils de diffusion autour du trou de forage [72].....	67
Figure III.6. Schéma structurel du (SPSPV) [77]	71
Figure III.7 Schéma d'un système généralisé de pompage de l'eau par énergie solaire PV [55].....	73
Figure III.8 Les étapes de la conception d'un système de pompage solaire PV [58].....	74

Figure III.9 Principaux types de moteurs électriques pour les applications de pompes PV [57]	79
Figure IV.1 La situation géographique du lieu d'études du site [A]	88
Figure IV.2 La situation géographique du lieu d'étude du site [B]	88
Figure IV.3 Vue en images des deux types de systèmes à pivot central : moderne (à gauche) et artisanal (à droite).	91
Figure IV.4 Stades de culture, durée de la période de croissance en jours et coefficients de culture	95
Figure IV.5 L'organigramme du travail, étape par étape [98]	97
Figure IV.6 La nouvelle station PV destinée à alimenter deux pivots	98
Figure IV.7 Onduleur (110kW) de pompe solaire hybride	99
Figure IV.8 schéma de système de pompage solaire PV hybride	100
Figure IV.9 Onduleurs monophasés pour le système PV autonome	100
Figure V.1. Volume d'eau utilisé en fonction des stades de croissance des cultures pour l'irrigation traditionnelle et les résultats simulés de CROPWAT (m ³) pour le site A...	105
Figure V.2. Volume d'eau utilisé en fonction des stades de croissance des cultures pour l'irrigation artisanal et les résultats simulés de CROPWAT (m ³) pour le site B [98] ...	106
Figure V.3. Différence entre les quantités d'eau appliquées dans la planification artisanal et les valeurs du modèle CROPWAT pour les différents stades de croissance des cultures [98]...	107
Figure V.4 Orientation et angle d'inclinaison du module PV sur le site A	118
Figure V.5 Orientation et angle d'inclinaison du module PV sur le site B	118
Figure V.6 Organigramme de différents cas de simulation	119
Figure V.7 Puissance crête du station PV autonome pour le pivot moderne	120
Figure V.8 Puissance crête du station PV autonome pour le mini pivot artisanal	121
Figure V.9 Diagramme de perte détaillé pour le système photovoltaïque Si-mono de 51.2 kWc connecté au réseau	124
Figure V.10 Diagramme de perte détaillé pour le système photovoltaïque Si-mono de 8 kWc connecté au réseau	126

Liste des tableaux	
Tableau II.1 Potentiel solaire en Algérie [34].....	32
Tableau II.2 Caractéristiques les plus recherchées d'une batterie solaire comparées à celle de démarrage [35].....	51
Tableau IV.1. Variétés et Date de plantation des cultures du site [A].....	91
Tableau IV.2. Variétés et date de plantation des cultures du site [B].....	92
Tableau V.1. Données climatiques, précipitations et ETo du site A (Altitude 80 m, Latitude 33.06 N, Longitude 6.04 E)	103
Tableau V.2 Données climatiques, précipitations et ETo du site B (Altitude 63 m, Latitude 33.29 N, Longitude 6.47 E)	104
Tableau V.3 Planification traditionnelle de l'irrigation du blé d'hiver.....	109
Tableau V.4. Produit total des cultures étudiées.....	111
Tableau V.5. Puissances mesurées des systèmes d'irrigation.....	112
Tableau V.6 . Besoins énergétiques totaux saisonniers des pivots modernes	112
Tableau V.7. Besoins énergétiques totaux saisonniers des mini pivots (artisanaux).....	113
Tableau V.8 Caractéristiques des systèmes de pivot central étudiés	114
Tableau V.9 Indicateurs d'efficacité énergétique.....	114
Tableau V.10 Eau d'irrigation, rendement et efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures [98]	116
Tableau V.11 Résumé du résultat de la simulation des stations PV autonomes.....	120
Tableau V.12 Puissance des pompes installées et leurs puissances crêts équivalentes des stations PV	122
Tableau V.13 Base de conception des stations PV autonomes.....	122
Tableau V.14 Sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) : Cas de Pivot moderne.....	123
Tableau V.15 Energie produite et requise et énergie déficitaire : cas de pivot moderne	124
Tableau V.16 Sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) : Cas de mini Pivot artisanal	125
Tableau V.17 Energie produite et requise et énergie déficitaire : cas de mini pivot artisanal	127

Nomenclature

Symboles		
A_{irr}	Superficie irriguée.	ha
b	Coefficient lié à la technologie spécifique du module PV.	-
D	Diamètre interne de la canalisation.	m
E	Source de tension (la batterie).	V
E	Énergie consommée par le système de pivot central.	kWh
E_h	Énergie hydraulique.	kWh/jour
EI	Efficacité de l'irrigation.	%
E_s	Indicateur d'énergie spécifique.	kWh/m ³
ET_C	Évapotranspiration de culture.	mm
ET_O	Évapotranspiration de référence.	mm
FF	Facteur de remplissage ou de forme du module PV.	-
G	Irradiation solaire normale.	W/m ²
g	L'accélération de la pesanteur.	m/s ²
G_0	Irradiation solaire standard.	W/m ²
H_{0T}	Hauteur verticale de la sortie d'eau au sol.	m
H_D	Pertes de charge linéaire.	m
H_d	Pertes de charge singulière.	m
H_{DT}	Niveau dynamique de l'eau dans le forage.	m
H_F	Perte de charge (singulière et linéaires) correspondant à Q_{AP}	m
H_{mt}	Hauteur manométrique totale.	m
H_R	Niveau d'eau de rabattement.	m
H_S	Hauteur statique.	m
I	Courant aux bornes du cellule PV.	A
I_{ac}	Courant de sortie AC de l'onduleur.	A
I_{cc}	Courant de court-circuit.	A
$I_{cc(o)}$	Courant de court-circuit du module PV sous l'irradiation G_0 .	A
I_{dc}	Courant d'entrée DC de l'onduleur.	A
I^G	Courant de la générateur (champ) PV	I
I_{mp}	Courant du point de puissance maximale.	A
I_{ph}	Courant photoélectrique.	A
I_s	Courant de saturation inverse de la diode.	A
k	Constante de Boltzmann $k = 5.67 \times 10^{-8}$.	J/°K
K_C	Coefficient cultural caractérisant le type de culture traité.	-
M_P	Nombre de modules en parallèle.	-

Abréviations

M_S	Nombre de modules en série.	-
n	Facteur d'idéalité de la diode.	-
N_s	Nombre de cellules PV connectées en série dans le module PV.	-
P	Puissance consommée par le système de pivot central.	kW
P_c	Puissance de la cellule PV.	W
P_e	Puissance d'entrée de l'onduleur.	W
P_{el}	Puissance électrique nominale du générateur PV	W
P_h	Puissance hydraulique crête nécessaire.	KW
P_{iff}	Précipitations efficaces fiables.	mm
P_{max}	Puissance de sortie maximale du module PV.	W
P_s	Puissance de sortie de l'onduleur.	W
q	Charge de l'électron.	C
q_b	Capacité actuelle de la batterie.	Ah
Q	Débit horaire de l'eau.	m ³ /h
Q_{AP}	Débit moyen, dit "débit apparent".	m ³ /h
Q_d	Quantité moyenne journalière d'eau pompée.	m ³ /jour
q_{max}	Capacité nominale de la batterie.	Ah
Q_{max}	Capacité maximale de débit du forage.	m ³ /h
R_o	Résistance interne de la batterie.	Ω
R_s	Résistance série.	Ω
R_{sh}	Résistance shunt.	Ω
SOC_{bat}	Etat de charge de la batterie.	%
T	Température de la jonction p-n.	°K
T_a	Température de l'air.	°C
T_{cell}	Température moyenne journalière des cellules.	°C
T_i	Temps total d'irrigation des cultures.	h
t_r	Insolation quotidienne moyenne réelle.	h
T_r	Température référentielle de la cellule (25 °C),	°C
V	Tension aux bornes du cellule PV.	V
v	Vitesse d'écoulement d'eau dans la canalisation.	m/s
V_{ac}	Tension de sortie AC de l'onduleur.	V
V_{bat}	Tension de la batterie.	V
V_{co}	Tension de circuit ouvert.	V
$V_{co(o)}$	Tension en circuit ouvert du module PV sous l'irradiation G_o .	V
V_{dc}	Tension d'entrée DC de l'onduleur.	V
V^G	Tension de la générateur (champ) PV.	V

Abréviations

V_{irr}	Volume d'irrigation quotidien.	$m^3/jour$
V_{mp}	Tension du point de puissance maximale.	V
V_t	Tension thermique de la cellule.	V
Y	Productivité de la culture.	kg/ha

Symboles grecs

α	Coefficient de calcul du débit moyen QAP	-
β	Coefficient qui est lié au type de composant (vannes, coudes...)	-
η_I	Efficacité de l'onduleur.	%
η_{MP}	Efficacité de l'unité moteur-pompe.	%
η_{MPI}	Efficacité de l'unité moteur-pompe et de l'onduleur.	%
λ	Coefficient de friction de la canalisation.	-

Abréviations

IR	Rayonnement infrarouge.
UV	Rayonnements ultraviolets.
DNI	Rayonnement normal direct.
EM	Spectre électromagnétique.
GHI	Irradiance horizontale globale.
AM	La masse d'air.
E _g	L'énergie de la bande interdite.
NOCT	Température normale de fonctionnement de la cellule.
STC	Conditions de test standard.
PPM	Point de sortie de puissance maximale.
MPPT	Suiveurs de point de puissance maximale.
SPSPV	Système de pompage d'eau solaire photovoltaïque.
PSH	Nombre d'heures d'ensoleillement maximal par jour.

Introduction Générale

Introduction générale

L'irrigation représente environ 70% de la consommation mondiale d'eau douce, dépassant 90% dans les régions sèches et semi-arides [1] et l'énergie requise pour le processus d'irrigation est l'un des intrants les plus importants de l'agriculture irriguée [2]. L'efficacité de l'utilisation des ressources et de l'énergie est l'une des principales exigences d'une agriculture éco-efficace et durable [3]. Par conséquent, l'agriculture et l'énergie ont une structure complémentaire et s'influencent mutuellement [3]. Dans le secteur agricole, l'objectif principal est d'atteindre une productivité maximale des cultures tout en économisant l'eau et l'énergie, ainsi qu'avec des coûts d'exploitation minimaux. La rationalisation de la consommation d'énergie dans les systèmes d'irrigation est devenue cruciale pour atteindre les objectifs de sécurité énergétique auxquels de nombreux pays ont donné la priorité. En améliorant l'efficacité énergétique et en adoptant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire pour l'irrigation, les pays peuvent réduire leur dépendance à l'égard des combustibles fossiles et les charges économiques et environnementales qui y sont associées.

L'utilisation de machines d'irrigation dans l'agriculture a augmenté l'efficacité de la distribution de l'eau sur de grandes étendues de terre et dans des endroits où les autres méthodes sont inefficaces, car son utilisation a permis une irrigation plus fréquente, une meilleure satisfaction des besoins en eau des cultures et une productivité accrue [4]. Les machines d'irrigation par aspersion autopropulsées appelées systèmes à pivot central ont été utilisées dans le monde entier en raison de leurs avantages par rapport aux autres systèmes d'irrigation, notamment en termes d'efficacité d'utilisation de l'eau.

L'irrigation est vitale pour la productivité agricole, mais les méthodes traditionnelles peuvent avoir de graves effets négatifs sur l'environnement, tels que les pénuries d'eau, la pollution et la salinisation des sols. L'irrigation durable permet d'allouer stratégiquement les réserves d'eau limitées, de réduire les volumes nécessaires à la production des cultures et d'atténuer les effets néfastes sur les sources d'eau et la qualité des sols. La mise en œuvre de ces systèmes n'est pas simplement une option, mais une nécessité impérieuse pour atténuer le stress hydrique, assurer la sécurité alimentaire et promouvoir la durabilité environnementale face à la pénurie croissante d'eau à l'échelle mondiale.

Pour répondre à ces préoccupations essentielles, l'intégration de technologies modernes et d'approches innovantes dans les pratiques d'irrigation gagne du terrain. Des méthodes

avancées telles que l'irrigation solaire et les techniques d'irrigation de précision offrent des perspectives prometteuses pour la conservation des ressources en eau et l'amélioration du rendement des cultures.

De nombreuses régions du sud de l'Algérie connaissent une forte tendance au travail et à l'investissement dans le secteur agricole. Depuis plus de deux décennies, le système d'irrigation par pivot a été largement adopté dans ces régions. L'utilisation de ces machines dans des endroits éloignés du réseau électrique a conduit à l'utilisation de générateurs diesel. Les générateurs diesel présentent de nombreux inconvénients tels que des coûts d'exploitation et de maintenance élevés et un approvisionnement en carburant peu fiable. En outre, l'irrigation se fait souvent de manière traditionnelle, ce qui entraîne un gaspillage d'eau et d'énergie et une baisse du niveau de la nappe phréatique. Les deux sites sélectionnés pour cette recherche sont directement confrontés à ces problèmes. Il est très important de trouver la meilleure solution à ce problème afin d'accroître la rentabilité des agriculteurs et d'évoluer vers une agriculture durable. L'utilisation d'énergies renouvelables est une option possible pour répondre aux besoins énergétiques sans affecter l'environnement.

Cette thèse répond à la nécessité d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie dans l'agriculture en se concentrant sur l'optimisation et la conception d'un système d'irrigation à pivot alimenté par l'énergie solaire. Les résultats et l'analyse dérivés de cette recherche contribueront à la base de connaissances et fourniront des recommandations pour des pratiques agricoles plus durables et plus efficaces sur le plan énergétique et hydrologique dans les régions d'étude.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les pratiques d'irrigation traditionnelles utilisant des systèmes d'irrigation par pivot dans des lieux géographiques spécifiques, dans le but de réduire les pertes d'eau et de minimiser la consommation d'énergie. Cette recherche s'efforce d'atteindre plusieurs objectifs spécifiques afin d'atteindre son but principal. Tout d'abord, des données primaires seront recueillies par le biais de visites sur le terrain et d'entretiens avec les parties prenantes concernées, ce qui permettra d'obtenir des informations de première main sur les pratiques d'irrigation et les difficultés rencontrées. En outre, des données secondaires provenant de publications et de sites web réputés seront utilisées pour compléter les résultats primaires et enrichir l'analyse. La détermination des besoins en eau des cultures et d'autres paramètres de conception pertinents sera un aspect crucial de cette étude, car elle informera la phase de conception ultérieure. En s'appuyant sur ces données de conception, un système photovoltaïque

de pompage de l'eau sera conçu pour optimiser l'efficacité de l'irrigation et l'utilisation de l'énergie. Enfin, les données de sortie collectées seront soigneusement analysées et interprétées afin de tirer des conclusions significatives et de comprendre l'efficacité des solutions proposées. Grâce à ces objectifs spécifiques, cette thèse vise à contribuer à l'avancement des pratiques d'irrigation durables et à la conservation des ressources vitales dans les milieux agricoles.

La thèse se compose de cinq chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale. La thèse est divisée en deux parties, la première partie comporte 3 chapitres et la deuxième partie comporte deux chapitres. Notons que les études de la littérature ont été discutées dans l'introduction des trois premiers chapitres en fonction du sujet du chapitre, et dans certains sous-titres qui doivent mentionner les développements dans le domaine de sujet de ce sous-titre.

Dans la première partie de cette thèse, le premier chapitre présente les fondements des systèmes de pivot d'irrigation moderne et artisanal. L'objet du second chapitre est consacré à l'état de l'art des systèmes photovoltaïque, en présentant des notions sur l'énergie solaire, l'effet PV, les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant ce système. La conception de système de pompage photovoltaïque pour les pivots en partant des besoins en eau des cultures au besoins énergétiques a été présenté en détail dans le chapitre 3.

Dans la deuxième partie, le quatrième chapitre est consacré à une présentation de la zone d'étude et la méthodologie appliquée, il a également abordé les entretiens et enquêtes de terrain et les mesures expérimentales pour la collecte des données. A la fin de ce chapitre, une présentation détaillée du projet de pivot solaire de Timimoun a été présentée. Nous avons présenté dans le chapitre cinq les résultats et leur discussion de ce travail de recherche.

On termine par une conclusion générale comportant les principales conclusions et quelques perspectives à finalité de compléter ce modeste travail. La thèse comprendra également des annexes à la fin du rapport.

Première Partie

Etat de l'art et littérature

Chapitre I

Fondements des systèmes de pivot d'irrigation

Chapitre I : Fondements des systèmes de pivot d'irrigation

I.1. Introduction

Les systèmes d'irrigation à pivot sont un type de technologie d'irrigation utilisé dans l'agriculture pour distribuer l'eau aux cultures. Ces systèmes sont généralement constitués d'un long bras qui tourne autour d'un point central ou "pivot" et porte des arroseurs sur toute sa longueur (Figure I.1). En tournant, le pivot distribue l'eau uniformément sur les cultures, garantissant qu'elles reçoivent la quantité d'humidité nécessaire à une croissance optimale.

Le système d'irrigation à pivot central a été inventé en 1949 par l'agriculteur Frank Zybach dans les régions arides du centre du Nebraska, aux États-Unis [5]. La conception pionnière de Zybach consistait en un point de pivot central à partir duquel une longue conduite d'eau tournait de manière circulaire, propulsée par un petit moteur à essence et soutenue par des tours mobiles. Le système d'irrigation par pivot s'est avéré être le plus économe en eau et en main-d'œuvre de tous les systèmes d'irrigation, et il permet d'irriguer facilement de vastes zones plates [6]. Toutefois, le coût initial de l'équipement et les besoins en énergie de la station de pompage sont quelques-unes de ses principales limites [7].

Au cours des trois dernières décennies, les machines à pivot central ont été considérablement améliorées, atteignant un haut degré de fiabilité mécanique et disposant de systèmes de manipulation et de contrôle relativement simples. Toutefois, il est nécessaire de procéder à une maintenance systématique en fonction des exigences cinématiques et des complexités de construction. Des données multi sources, notamment des mesures in situ, des données de télédétection et des données maillées météorologiques/climatiques/sols, sont utilisées pour l'irrigation de précision par pivots [8].

L'utilisation de l'énergie électrique dans les systèmes d'irrigation à pivot suppose une plus grande efficacité. Étant donné les avantages en termes de vitesse de déplacement par rapport aux machines à entraînement hydraulique, outre le fait qu'elles sont plus légères, qu'elles entraînent moins de pertes d'eau et que leur fréquence de rupture est plus faible [9]. Cependant, les systèmes d'irrigation à pivot central consomment de grandes quantités d'énergie électrique entre l'entraînement de la machine et le pompage de l'eau sous la pression requise.[4].

Des capteurs électroniques, des commandes d'équipement et des protocoles de communication ont été mis au point pour répondre à l'intérêt croissant pour l'irrigation

spécifique au site à l'aide de systèmes d'irrigation à pivot central. Les capteurs embarqués et distribués sur le terrain peuvent collecter les données nécessaires aux décisions de gestion de l'irrigation en temps réel et transmettre les informations directement ou par l'intermédiaire de réseaux sans fil au panneau de commande principal ou à l'ordinateur de base. L'actualité de ce type d'informations est essentielle pour les producteurs, car il est beaucoup plus avantageux pour eux de pouvoir procéder à des ajustements au fur et à mesure de l'apparition des problèmes, et non pas a posteriori [10]. Les données multispectrales peuvent être utilisées de plusieurs manières pour améliorer la conservation de l'eau et de l'énergie en aidant à déterminer les causes exactes de l'aspect non uniforme (et du rendement) de la culture [11]. Les développements récents dans l'industrie des pivots centraux ont conduit à des relations contractuelles entre les fournisseurs de pièces détachées et les fabricants de systèmes d'irrigation qui devraient permettre de développer davantage l'application d'eau, de nutriments et de pesticides en fonction du site à l'avenir [10].

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des composants fondamentaux et des principes de fonctionnement des systèmes d'irrigation à pivot. Il commence par examiner les éléments structurels qui composent ces systèmes, notamment les canalisations, l'unité centrale, les travées et les tours mobiles. Le chapitre se penche ensuite sur les principes de fonctionnement qui régissent la fonctionnalité de l'irrigation par pivot, en explorant la manière dont ces systèmes distribuent efficacement l'eau dans les champs agricoles.

La discussion porte ensuite sur les systèmes de contrôle et d'entraînement responsables de l'automatisation et de la gestion du processus d'irrigation par pivot. Cela inclut une analyse des différents mécanismes et technologies utilisés pour optimiser la distribution de l'eau et assurer un fonctionnement efficace. Enfin, le chapitre se termine par une étude de cas sur le pivot artisanal d'El Oued, offrant un aperçu de la manière dont les systèmes d'irrigation à pivot artisanaux, développés localement, ont été adaptés et mis en œuvre dans des contextes régionaux spécifiques. Il convient également de noter ici que la plupart des images présentées dans ce chapitre sont tirées de visites de terrain au projet Timimoun. En couvrant ces aspects clés, ce chapitre jette les bases pour comprendre les considérations complexes d'ingénierie et de conception impliquées dans la technologie d'irrigation par pivot.



Figure I.1. Surfaces circulaires irriguées sous pivots centraux [12]

I.2. Les éléments structurels

Au cours des trois dernières décennies, les machines à pivot central ont été assez bien perfectionnées. Elles sont mécaniquement fiables et simples à utiliser, bien que, comme toute machine, un entretien systématique de routine soit nécessaire [13]. Le système pivot d'irrigation est constitué par une canalisation de grande longueur, tournant autour d'un axe (point pivot) par lequel se fait l'arrivée d'eau et d'électricité (Figure I.2). La canalisation est portée, de proche en proche, par des tours mobiles équipées de roues, propulsées par des moteurs électriques. Les tours divisent l'appareil en travées rigidifiées par un système de triangulation et de tirants, la canalisation tenant lieu de poutre.

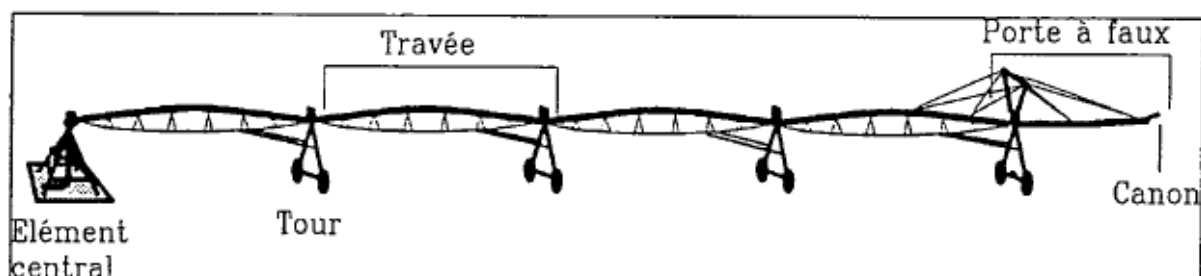


Figure I.2 Schéma de principe d'un pivot [14]

L'unité centrale constitue la seule partie fixe de la structure du pivot central d'irrigation. C'est l'élément fixe au centre de la parcelle, tourne autour duquel le reste de la machine

d'irrigation et c'est le point où se fait l'alimentation en eau et électricité. Sa charpente formant une pyramide en poutrelles d'acier à base carré est assemblée à un socle en béton armé et la conduite d'eau venant du réseau hydraulique sous pression passe dans le centre de la pyramide vers la colonne montante sur l'axe de rotation de l'ensemble. L'énergie électrique est distribuée à la machine soit par un collecteur circulaire à balais pour les appareils effectuant une rotation complète, soit par un câble pour celles fonctionnant en secteur. Un exemple de l'unité centrale est montré par la figure I.3.



Figure I.3 Vue de l'unité centrale

La canalisation ou la rampe est une longue structure horizontale qui s'étend à partir du point de pivot. C'est le conduit par lequel l'eau est transportée de la source au champ. Cet élément doit être robuste pour résister aux forces exercées pendant la rotation et porter l'infrastructure nécessaire à l'acheminement de l'eau. Elle est menée avec des émetteurs d'eau (arroseurs, bulleurs ou pulvérisateurs) (Figure I.4) peut avoir un diamètre de 140 à 250 mm, selon le débit du système et la longueur ; les tailles standard d'environ 160 mm (6 pouces) et 200 mm (8 pouces) sont très courantes et la longueur du pipeline peut être de 50 à 750 mètres selon la conception [15].

Les structures des pivots sont coupées par les tours pour former une succession de travées (poutres) (voir Figure I.4). Il existe différents modèles de travées dont l'élément principal est dans tous les cas la canalisation dans laquelle circule l'eau, qui est composée de tuyaux de différentes longueurs [16]. La triangulation et les tirants sont les éléments structurels destinés

à éviter l'affaissement et à assurer la stabilité des travées. Ces éléments forment un système en forme de treillis, répartissant efficacement les charges et les forces. Ils contribuent à maintenir l'intégrité structurelle de l'ensemble du système, en particulier dans des conditions météorologiques difficiles. Les travées sont reliées entre elles au niveau des tours par des joints qui permettent à l'ensemble de se désaligner.

La tour supporte la conduite (travée) à une hauteur au-dessus du sol qui correspond à la taille maximale des cultures (en général 4 mètres) et assure la mobilité de la rampe grâce à deux roues commandées par un moteur électrique. Généralement, la structure de la tour est constituée de deux montants reliés entre eux par un essieu long d'environ quatre mètres sur lequel sont fixés le moteur et les deux roues (Figure I.4).

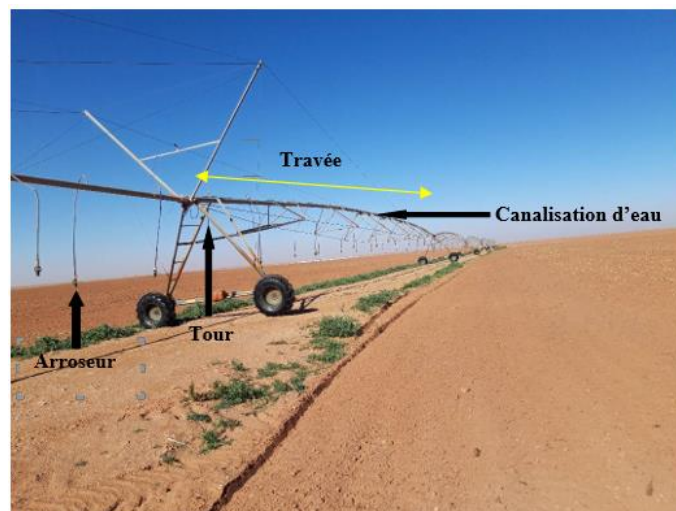


Figure I.4. Canalisation, arroseurs, tours et travées d'un pivot central

Le porte-à-faux c'est la flèche d'extrémité et la canalisation suspendue au-delà de la dernière tour, (voir Figure I.5). Les longueurs des rampes d'extrémité varient de 6 à 24 m et sont standardisées en rapport avec les longueurs de canalisation. Les rampes d'extrémité peuvent être équipées de nombreuses options, notamment d'une grande variété de pistolets (cannons) d'extrémité et de pompes de surpression.

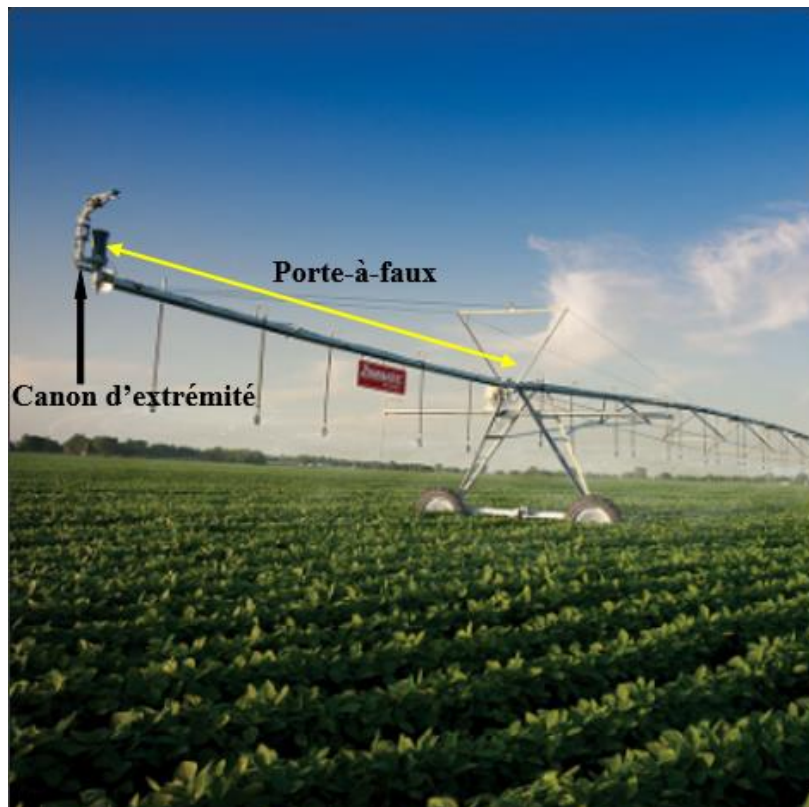


Figure I.5. Vue de port -à- faux avec pistolet d'extrémité

I.3. Principes opérationnels

Le mouvement de rotation du système est assuré par les moteurs électriques à courant alternatif (AC) reliés aux tours. Le contrôle de ce mouvement est crucial pour une distribution uniforme de l'eau où l'ingénierie de précision du mécanisme de rotation assure une trajectoire circulaire cohérente et contrôlée. Le désalignement des travées d'une rampe pivotante les unes par rapport les autres provoquent l'avancement de l'appareil. Le déclenchement des groupes motoréducteurs se fait par un système micro-interrupteur à came (Il y a deux micro-interrupteurs dans chaque boîtier de la tour qui sont actionnés par la tige de commande) ayant des contacts électriques sensibles au désalignement des travées lorsque ces deux dernières de chaque côté d'un tour forment un angle donné (Figure I.6). Chaque tour intérieure est équipée d'une tige de commande fixée entre le caisson de la tour et une petite languette sur la travée extérieure suivante. Lorsque la travée se déplace, la tige de commande active un micro-interrupteur qui met sous tension le contacteur, envoyant 400 VAC au moteur d'entraînement.

Lorsque la tige de commande se déplace suffisamment, l'interrupteur de marche est activé et la tour commence à se déplacer. La tour continue à se déplacer jusqu'à ce qu'elle soit à nouveau alignée, ce qui désactive le micro-interrupteur.

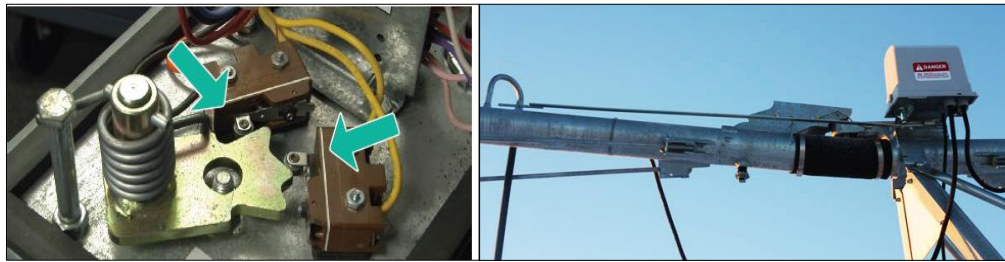


Figure I.6 Boîtier de la tour à deux micro-interrupteurs

Pour simplifier la description du principe d'avancement d'un pivot prenons un exemple d'un pivot à trois unités d'entraînement (tours). L'unité d'entraînement d'extrémité la plus éloignée du pivot étant la tour 3, suivi par la tour 2, puis la tour 1 et enfin le point pivot (Figure I.7). Dans un système d'irrigation à pivot central, le mouvement est orchestré par un processus d'activation séquentiel, assurant une rotation douce et coordonnée à travers le champ. Lorsque le pivot commence son mouvement, il est guidé par la dernière unité d'entraînement, placée à l'extrémité du système. La prend les devants, propulsant le pivot vers l'avant jusqu'à ce que le bras d'aiguillage, qui relie la dernière travée à l'avant-dernière tour, soit tiré à un angle (α_0) qui déclenche l'activation de la tour suivante. Cette action incite la dernière et l'avant-dernière tour à se déplacer à l'unisson jusqu'à ce que la tour suivante de la séquence soit activée. Ce modèle d'activation séquentielle se répercute sur toute la longueur du pivot, chaque tour prenant successivement la tête du mouvement jusqu'à ce que toutes les tours aient contribué à la rotation du pivot. Ce processus synchronisé assure une couverture efficace du champ, permettant une distribution optimale de l'eau aux cultures situées en dessous.

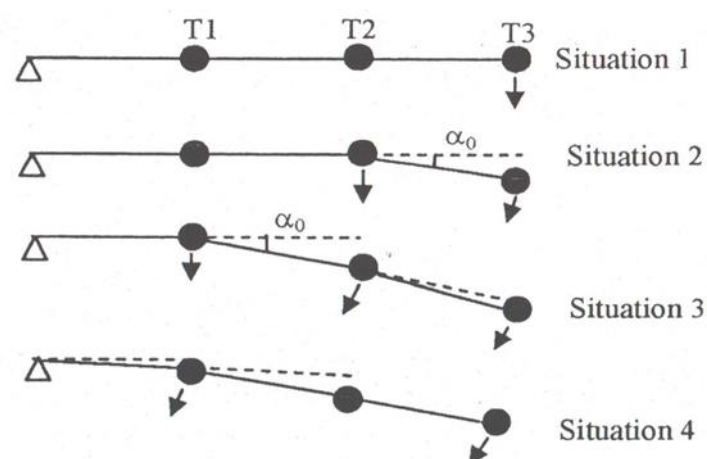


Figure I.7. Schéma du déplacement d'un pivot central d'irrigation [17]

Pour un système d'irrigation à pivot central, la sélection et le dimensionnement du système de pompage sont essentiels pour garantir qu'il réponde aux besoins en eau du système

tout en tenant compte de facteurs tels que la taille du champ, les changements d'altitude et les pertes par frottement. En outre, l'entretien et la surveillance réguliers de la pompe et des composants associés sont essentiels pour garantir des performances optimales, un approvisionnement en eau fiable et un fonctionnement efficace du système d'irrigation à pivot central. Le système de pompage d'un pivot d'irrigation joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau du système et dans l'efficacité de son fonctionnement.

Les types de pompes utilisées pour acheminer l'eau pour l'irrigation comprennent les pompes centrifuges horizontales et les pompes verticales à turbine ou submersibles. La pompe est entraînée par un moteur électrique ou un moteur à combustion interne, fournissant la puissance nécessaire pour propulser l'eau dans le système. Le rendement énergétique des moteurs électriques est beaucoup plus élevé que celui des moteurs à combustion où l'efficacité du groupe de pompage est un facteur important pour le débit d'eau, la hauteur de pression et les coûts énergétiques [18]. Les pompes centrifuges horizontales sont couramment utilisées pour pomper de l'eau à partir d'une source ouverte ou pour ajouter de la pression à un pipeline. Comme le montrent les Figures I.8, ces pompes ont un arbre horizontal et peuvent être couplées à un moteur électrique ou entraînées par un moteur à combustion interne. La Figure I.9 montre une installation typique où l'eau est pompée d'un étang ou d'un cours d'eau [19].

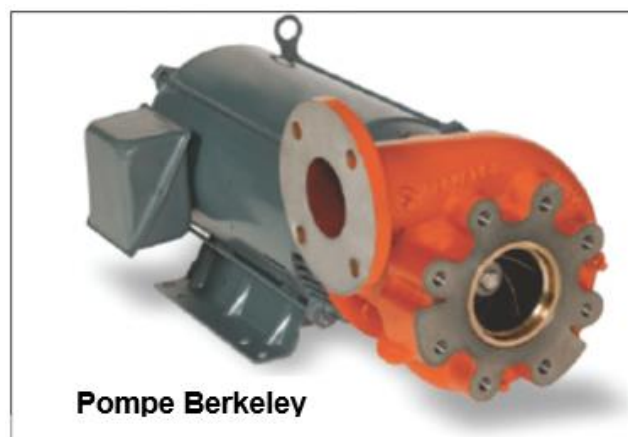


Figure I.8 Exemple de pompes centrifuges horizontales [20]

Les pompes centrifuges offrent plusieurs avantages dans le domaine de l'irrigation, notamment un rendement élevé, la fiabilité et la facilité d'entretien. Leur conception simple permet un fonctionnement continu sans pannes fréquentes, ce qui réduit les temps d'arrêt et augmente la productivité. En outre, les pompes centrifuges peuvent gérer une large gamme de débits et de pressions, ce qui les rend polyvalentes pour divers systèmes d'irrigation et types de

cultures. Leur capacité à fonctionner avec des hauteurs de charge faibles ou élevées leur permet de pomper de l'eau sur de longues distances et d'assurer une alimentation en eau régulière des champs, même sur des terrains difficiles.

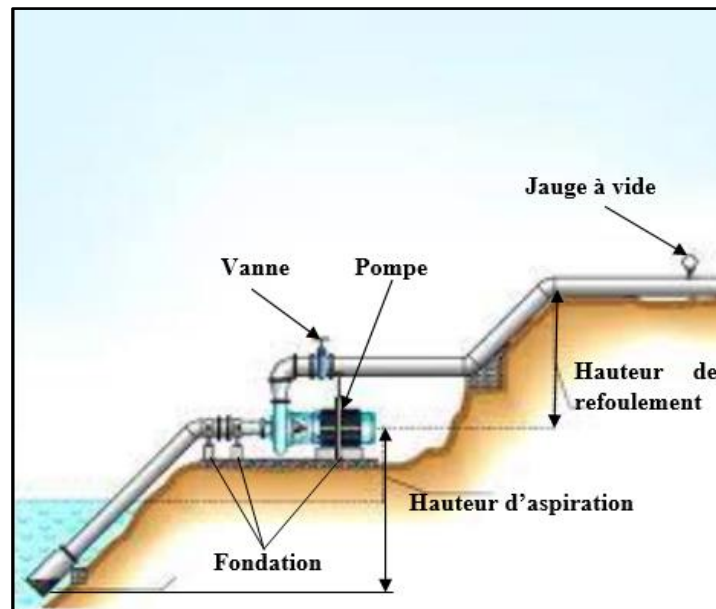


Figure I.9 Pompes centrifuges horizontales aspirant l'eau d'un étang [19]

Les pompes centrifuges sont également utilisées pour ajouter de la pression à l'eau dans une canalisation. Une utilisation courante des pompes centrifuges pour les pivots centraux consiste à augmenter la pression de l'eau fournie à un pistolet d'extrémité, comme l'illustre la Figure I.10.



Figure I.10 Exemple de pompe centrifuge utilisée pour augmenter la pression

Les pompes verticales à turbine et les pompes submersibles sont utilisées pour pomper l'eau d'un puits (forage) (Figure I.11). Dans le cas des pompes à turbine, l'eau pénètre dans l'œil de la roue et, sous l'effet de la force centrifuge, l'eau est poussée vers l'extérieur et vers le haut par les ailettes de la roue. Ce processus développe la hauteur de charge nécessaire à un système d'irrigation. L'élévation de l'eau et son acheminement à la pression souhaitée peuvent nécessiter

la mise en place des roues et des bols. Cela signifie que l'eau sera pompée d'une roue dans une autre jusqu'à ce que la hauteur de charge souhaitée soit atteinte [19].

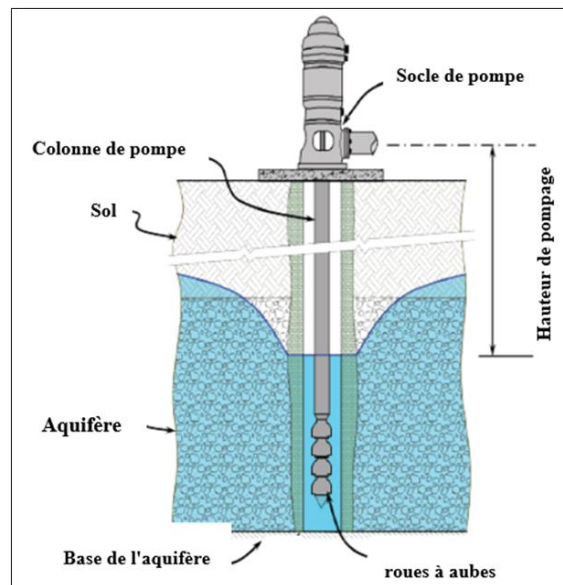


Figure I.11 Système de pompe à turbine vertical [19]

Les pompes submersibles sont très semblables aux pompes à turbine verticale, sauf qu'elles sont entraînées par un moteur électrique directement sous la pompe (Figure I.12). Cette conception réduit les inefficacités observées dans les systèmes d'entraînement à turbine verticale. Les pompes submersibles sont très efficaces dans les puits profonds et peuvent être utilisées dans des puits d'un diamètre de 4 pouces seulement.



Figure I.12 Exemples de pompes submersibles [19]

Les caractéristiques hydrauliques du système de pompage peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité et les performances du système d'irrigation à pivot central. Les principales caractéristiques hydrauliques du système de pompage sont les suivantes :

- ✚ Hauteur de charge : la hauteur de charge est la pression que la pompe doit générer pour acheminer l'eau vers les arroseurs.
- ✚ Débit : Le débit est la quantité d'eau que la pompe peut fournir par unité de temps.
- ✚ Rendement : Le rendement est le pourcentage de la puissance absorbée par la pompe qui est utilisée pour acheminer l'eau vers les arroseurs.

La hauteur de charge et le débit du système de pompage doivent être adaptés aux exigences du système d'irrigation à pivot central. Si la hauteur de charge est trop faible, la pompe ne sera pas en mesure de fournir de l'eau aux arroseurs. Si le débit est trop faible, les arroseurs ne pourront pas irriguer l'ensemble du champ. L'efficacité du système de pompage est également importante. Une pompe plus efficace consomme moins d'énergie, ce qui permet d'économiser de l'argent sur les coûts d'exploitation.

Une étape importante dans la conception d'un système d'irrigation consiste à choisir la pompe appropriée pour faire fonctionner le système. Avant d'effectuer cette opération, il faut déterminer le débit souhaité du système et la hauteur de pression requise au niveau du refoulement de la pompe. Il est également utile de développer la courbe de la pression d'entrée du système en fonction de la décharge, qui est appelée "courbe H-Q du système".

Les buses d'arrosage sont positionnées stratégiquement le long du tuyau pour disperser l'eau de manière uniforme. La conception de ces buses, y compris les types de buses et leur espacement, a une incidence sur l'uniformité de l'application de l'eau [21]. Un bon calibrage garantit que l'eau atteint les cultures au taux et à la couverture souhaités. Le choix d'un ensemble d'arroseurs approprié est essentiel pour l'efficacité d'un système d'irrigation. Les arroseurs doivent pouvoir appliquer l'eau de manière uniforme tout en réduisant le ruissellement, l'évaporation et la dérive. Les arroseurs doivent être espacés correctement et à la bonne hauteur pour maximiser l'uniformité de l'application. En outre, le fait de faire fonctionner le système à la pression prévue permet d'éliminer de nombreux problèmes liés à l'uniformité de l'application [19]. Si les arroseurs sont équipés de buses de contrôle du débit ou de la pression, la décharge sera constante sur une plage de pression considérable [13]. Il existe différents types d'arroseurs, tels que les arroseurs à impact et les arroseurs à basse pression

(Figure I.13), qui peuvent être sélectionnés en fonction des besoins spécifiques des cultures et du sol.



Figure I.13 Arroseurs d'irrigation à basse pression

Comme dans les autres systèmes d'irrigation, la chimigation est le processus qui consiste à injecter un produit chimique dans l'eau d'un système d'irrigation en fonctionnement et à l'appliquer sur la zone du champ où cette pratique est largement adoptée avec l'irrigation par aspersion à pivot central [22]. Les pivots centraux sont utilisés pour appliquer des engrais, des insecticides, des herbicides, des fongicides et des nématicides vue leur uniformité de l'application de l'eau élevée ce qui entraîne à une chimigation efficace et plus économique que tout autre moyen, y compris les systèmes de pulvérisation au sol et les avions ou hélicoptères [13]

L'application d'engrais avec de l'eau d'irrigation, ou fertigation, est très courante et présente de nombreux avantages. La plupart des fertigation utilisent des formulations solubles ou liquides d'azote, de phosphore, de potassium, de magnésium, de calcium, de soufre et de bore, tel que l'azote est le plus souvent appliqué car les cultures en ont besoin de grandes quantités [23].

L'utilisation de pompes volumétriques est fortement recommandée pour les injections de produits chimiques liquides, ces pompes doivent être réglables et capables d'injecter n'importe quel produit chimique soluble dans l'eau à de faibles niveaux de concentration [5]. La Figure I.14 montre les composants d'un système d'injection des produits chimiques d'un pivot central d'irrigation.

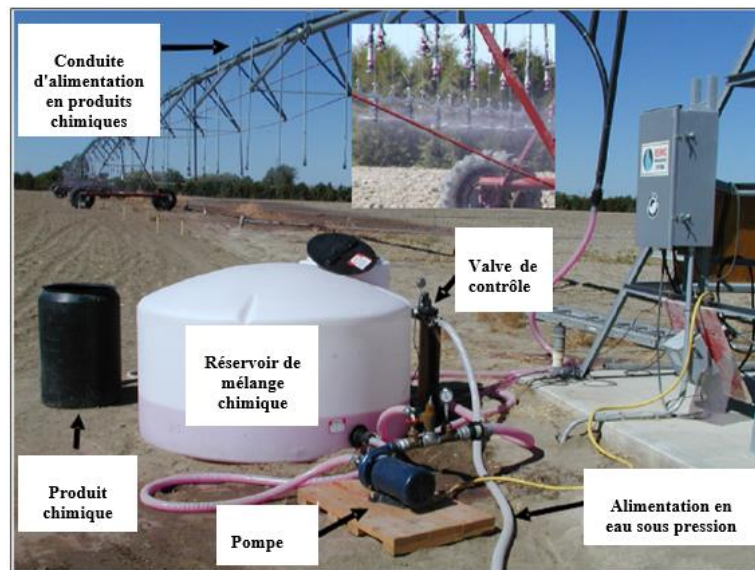


Figure I.14 Vue des composants clés du système d'application chimique indépendant utilisant des mini-asperseurs [22]

I.4. Système de commande et d'entraînement

L'énergie électrique devient la plus courante dans le fonctionnement des pivots d'irrigation. Dans un système d'irrigation à pivot central, de l'énergie est nécessaire pour le pompage de l'eau à une certaine pression et pour l'entraînement du pivot. Cette énergie peut être électrique ou thermique où l'électricité peut être produite par un générateur. Si l'accès au réseau local est possible un transformateur est généralement installé en bordure du champ et une ligne privée achemine le courant jusqu'au système d'irrigation. Cependant, très souvent, l'énergie est obtenue sur place en utilisant un générateur couplé à la pompe ; l'unité est entraînée par l'énergie thermique (diesel, huile, gaz, essence).

Le dispositif d'irrigation à pivot central est contrôlé par le panneau de commande monté sur la tour centrale (Figure I.15). Ce tableau de commande modulaire est protégé dans une armoire et sert d'interface entre les opérateurs et le système d'irrigation. Il permet d'entrer des commandes, d'effectuer des réglages et de surveiller les paramètres clés (fonctionnement de la machine et la programmation de l'irrigation). La conception conviviale des panneaux de contrôle simplifie le fonctionnement et l'entretien du système.

L'équipement standard d'un panneau de commande est le suivant :

- ✚ Interrupteurs (marche avant/arrière et automatique) ;
- ✚ Une unité de dosage cyclique numérique ou analogique ;

- ✚ Indicateurs des boutons-poussoirs de sécurité ;
- ✚ Un transformateur, généralement : 380/110 volts ;
- ✚ Une protection électrique telle que des disjoncteurs, des relais de sécurité, des contacteurs différentiels, des sectionneurs-fusibles commandés depuis l'extérieur de l'armoire, etc.
- ✚ Un voltmètre.

Pour contrôler le bon fonctionnement des machines à pivot central, des dispositifs de sécurité sont nécessaires pour maintenir les éléments de la rampe en ligne, pour contrôler la vitesse de rotation et pour arrêter le pivot s'il se désaligne ou si l'alimentation en eau est coupée et qu'il manque d'eau. En outre, en cas de défaillance du pivot, il existe normalement un système de contrôle permettant de couper l'écoulement de l'eau [13].



Figure I.15. Panneau de commande pour un système de pivot central.

La puissance nécessaire pour le fonctionnement du système pivot d'irrigation doit prendre en compte :

- ✚ Du besoin de la station de pompage de l'eau pour mettre en pression le débit requis du système d'irrigation, cette puissance résulte du dimensionnement hydraulique du pivot. En général la puissance installée est de 1kVA par CV, augmentée de la puissance essentielle au pompage.

✚ Du besoin des motoréducteurs des tours mobiles destinés au déplacement du pivot. L'approche de calcul de leur énergie nécessaire prend effectivement en compte que tous les moteurs ne fonctionnent pas simultanément. Vu que cette puissance est très variable, il existe différentes règles pour estimer cette puissance avec un bon aperçu. La formule suivante est parfois conseillée : **La puissance d'avancement du pivot = 1.23x(Puissance d'un moteur + 0.6x Somme des puissances des autres moteurs)**, où le fonctionnement nominal, les rendements et les facteurs des puissances moyens sont pris en compte.

La classification fondamentale des moteurs suit le type de courant électrique qui les alimente : le courant continu (CC) et le courant alternatif (CA). Parmi les moteurs à courant alternatif, les moteurs à induction triphasés asynchrones sont de loin les plus utilisés et recommandés si le périmètre d'irrigation dispose de l'alimentation électrique. Les moteurs électriques asynchrones triphasés sont souvent utilisés dans l'irrigation à pivot central pour entraîner les pompes dans les stations de pompage d'eau et pour la rotation de ces rampes pivotantes dans le champ. Pour le déplacement, chaque tour est équipée d'un moteur électrique (HP standard 0,75) accouplé à un réducteur de vitesse (motoréducteur) dans lequel une première réduction de la rotation est assurée (Figure I.16).

Dans un système d'irrigation à pivot central, le moteur et le motoréducteur, ainsi que les composants de la transmission de puissance, jouent un rôle essentiel dans l'entraînement du mouvement de la structure du pivot et garantissent un fonctionnement efficace.



Figure I.16. Moteur électrique accouplé à un réducteur de vitesse monté sur tour mobile

Pour réduire encore la vitesse de rotation, les roues sont boulonnées sur des réducteurs de vitesse (Figure I.17). Le temps de rotation minimum pour les latéraux à pivot central standard produits par la plupart des fabricants est d'un peu moins de 24 heures où les vitesses typiques des roues sont de 2 à 3 m/min [13]



Figure I.17. Roue d'une tour mobile montée sur un réducteur de vitesse

Les systèmes d'irrigation à pivot central jouent un rôle essentiel dans les pratiques agricoles en acheminant efficacement l'eau vers les cultures. L'efficacité et la durabilité de ces systèmes peuvent être améliorées par la mise en œuvre de systèmes de contrôle avancés et d'options d'automatisation. Parmi les différents systèmes de contrôle et les technologies d'automatisation disponibles pour l'irrigation à pivot central, en soulignant leurs avantages et leurs applications potentielles sont les suivantes [10]:

Surveillance et contrôle à distance : Grâce aux progrès technologiques, les systèmes de surveillance et de contrôle à distance ont révolutionné la gestion de l'irrigation à pivot central. Ces systèmes permettent aux agriculteurs de surveiller et de contrôler leurs opérations d'irrigation où qu'ils se trouvent, à l'aide d'appareils mobiles ou d'ordinateurs. Les données en temps réel sur l'humidité du sol, les conditions météorologiques et les performances du matériel sont accessibles, ce qui permet de procéder à des ajustements en temps voulu et de prendre de meilleures décisions.

Capteurs d'humidité du sol : L'intégration de capteurs d'humidité du sol dans le système de contrôle fournit des informations précieuses pour optimiser la programmation de l'irrigation. Ces capteurs mesurent la teneur en eau à différentes profondeurs du sol, ce qui permet aux agriculteurs d'apporter de l'eau précisément au moment et à l'endroit où elle est nécessaire. En évitant la sur-irrigation, les ressources en eau sont préservées et le risque de stress ou de maladie des cultures est réduit.

Surveillance météorologique : Les conditions météorologiques ont un impact significatif sur les besoins en irrigation. L'intégration de dispositifs de surveillance météorologique, tels que des capteurs de pluie et des capteurs d'évapotranspiration (ET), dans

le système de contrôle garantit que l'irrigation est ajustée en fonction des données météorologiques en temps réel. Cela permet d'éviter les irrigations inutiles pendant les périodes de pluie ou de forte humidité, ce qui favorise l'utilisation rationnelle de l'eau.

Irrigation à débit variable (VRI) : La technologie VRI permet aux agriculteurs d'appliquer l'eau de manière différenciée dans le champ en fonction des besoins en eau des cultures. En divisant le champ en zones et en ajustant les taux d'application de l'eau en conséquence, VRI optimise l'efficacité de l'irrigation et minimise le gaspillage d'eau. Cette technologie est particulièrement utile dans les régions où les types de sol, la topographie ou les besoins en eau des cultures varient.

Automatiser le contrôle des canons d'extrémité : Les systèmes à pivot central utilisent souvent un canon d'extrémité, qui irrigue les bords extérieurs du champ. Les systèmes automatisés de contrôle des pistolets d'extrémité peuvent gérer avec précision le fonctionnement du pistolet d'extrémité en fonction de la position du pivot, garantissant ainsi une distribution uniforme de l'eau dans le champ. Cette fonction réduit le gaspillage d'eau en évitant la pulvérisation excessive et améliore l'efficacité globale du système d'irrigation.

Les systèmes d'irrigation à pivot central sont l'un des types de systèmes d'irrigation les plus répandus dans le monde. Ils sont relativement efficaces, mais ils peuvent encore être améliorés en utilisant des systèmes de contrôle et des options d'automatisation plus durables et plus efficaces. Ces dernières années, le développement des systèmes d'irrigation à pivot central a progressé de manière significative. Ces progrès sont dus à la nécessité d'améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes d'irrigation, ainsi qu'à la disponibilité croissante de nouvelles technologies.

Les progrès et les tendances des systèmes d'irrigation à pivot central sont prometteurs. Ces progrès peuvent rendre les systèmes d'irrigation à pivot central plus efficaces, plus durables et plus rentables. Par conséquent, les systèmes d'irrigation à pivot central sont susceptibles de devenir encore plus populaires à l'avenir.

I.5. Le pivot artisanal d'El oued

Dans les années 1990, une évolution a eu lieu concernant les pivots centraux dans la vallée de l'Oued Souf. Les artisans locaux ont progressivement développé des pivots centraux à petite échelle et à faible coût en modifiant la conception des pivots centraux à grande échelle

qui n'avaient pas réussi en Algérie [24]. Dans la vallée de l'Oued Souf, plus d'un million de tonnes de pommes de terre, soit 40 % de la production nationale, sont produites chaque année par 36 000 pivots artisanaux [25].

Contrairement des pivots moderne de grande dimension et plusieurs travées, le pivot artisanal se compose d'une seule travée comme le montre la Figure I.18, avec une longueur totale entre 40 et 80 m.

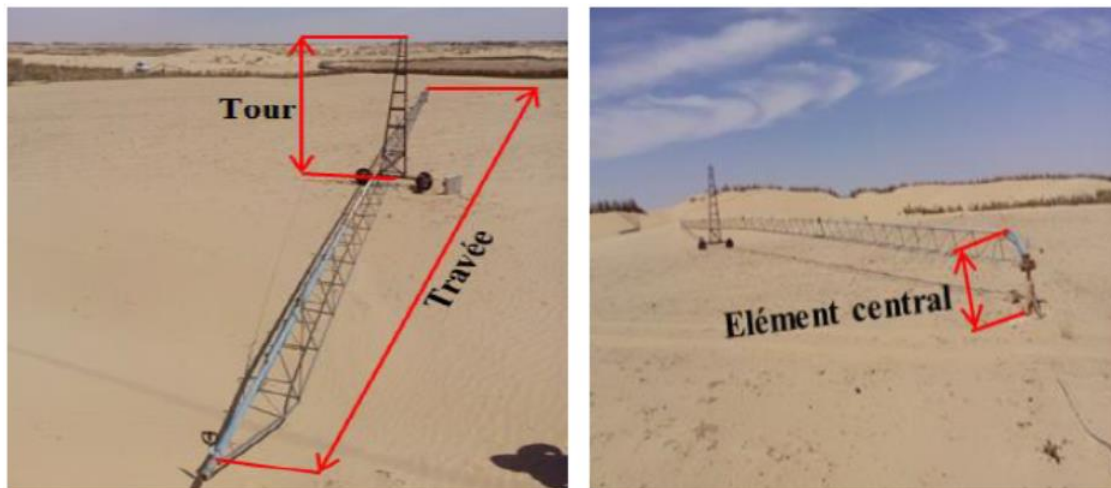


Figure I.18. Composantes du pivot artisanal [24]

Le pivot central artisanal est un mini pivot de petite dimension, se compose d'une seule travée et une seule conduite de diamètre 60mm posée sur une tour mobile et suspendue par des câbles en acier, à une distance d'équilibre de l'élément central. La travée est constituée par une canalisation droite incluse dans une poutre, rigidifiée par une structure en charpente métallique de forme triangulaire, laisse un dégagement sous structure de 1 à 1.2 m sur laquelle sont répartir les buses d'arrosage. La tour est une poutre en charpente métallique de forme pyramide et de hauteur entre 4 et 5m fabriquée soi en tubes d'acier galvanisé ou par cornières en acier. Elle est équipée de deux roues pour l'avancement animées par un moteur électrique couplé à un réducteur de vitesse (Figure I.19).

Le mini pivot artisanal fonctionne à une faible pression, 1.2 à 1.5 bar environs où la seule solution possible pour lui alimenter en eau dans toute la région est le gavage direct à partir d'un puits forage.



Figure I.19 Moteur électrique et réducteur

L'armoire de commande : Généralement le pivot artisanal est alimenté par l'électricité réseaux, sauf dans le cas où l'axe à cette dernière est impossible le générateur diesel prend le rôle de l'alimentation de l'appareil. L'énergie électrique est utilisée au niveau de l'unité de pompage de l'eau et la motorisation. Habituellement les agriculteurs utilisent un seul puits pour alimenter une paire de pivots, l'armoire de commande est installée près de puits et de vannes où les câbles électriques des deux moteurs de traction des deux pivots et du groupe motopompe sont connectés à l'armoire (Figure I.20). L'armoire est équipée d'une minuterie pour l'auto démarrage et arrêt du système et avec des interrupteurs pour choisir l'action appropriée. Aussi l'armoire est équipée avec une protection électrique telle que des disjoncteurs, des relais de sécurité,

Jusqu'à l'année 2013 le pompage de l'eau été assuré par des groupes des pompes centrifuges de surface, mais après cette date les agriculteurs ont orienté vers l'utilisation des groupes submersibles avec puits forage plus profond atteints le 45m de profondeur. Le groupe motopompe est constitué d'un moteur électrique asynchrone triphasé généralement avec une gamme de puissances, 4 ; 5.5 ; 7.5 ; 10CV couplé à une pompe centrifuge.

Le moteur de traction destiné pour motoriser l'appareil est un moteur électrique asynchrone triphasé de faible puissance (0.7 ; 1 ; 1.5CV) couplé à un réducteur de vitesse. Le déplacement du pivot artisanal à travers le champ s'effectue d'une façon continue à une vitesse constante.



Figure I.20 L'armoire de commande de deux pivots et un groupe motopompe

I.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré les fondements des systèmes d'irrigation à pivot central, couvrant les parties fonctionnelles, les systèmes de contrôle, les systèmes de pompage, les moteurs et la transmission de puissance, les systèmes d'alimentation, et les tendances dans l'irrigation à pivot central. Il a mis en évidence l'importance de comprendre ces aspects pour optimiser les performances et adopter les progrès. L'intégration de l'irrigation de précision, de l'IRV, de la connectivité sans fil, de la surveillance à distance, de l'agriculture de précision, de la durabilité et des tendances en matière de surveillance des cultures peut améliorer l'efficacité de l'eau, augmenter la productivité et contribuer à un avenir agricole durable. Ce chapitre a également abordé l'introduction du petit dispositif d'irrigation à pivot central innovant au niveau local d'El Oued, qui a fait une différence dans la production agricole nationale. En conclusion, la centralité de l'énergie électrique dans le domaine des systèmes d'irrigation à pivot central est primordiale, car elle joue un rôle essentiel dans l'efficacité et la précision des pratiques agricoles modernes. L'interaction complexe de l'énergie électrique avec les composants fondamentaux, notamment les moteurs électriques, les panneaux de commande et la station de pompage essentielle, constitue l'épine dorsale de la fonctionnalité du système.

Chapitre II

Système photovoltaïque

Chapitre II : SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction

La demande d'énergie augmente dans le monde entier en raison de l'accroissement de la population et du développement économique. À l'heure actuelle, la production d'énergie à partir de sources d'énergie conventionnelles a un impact important sur les conditions environnementales et la sécurité énergétique en raison de l'épuisement rapide des combustibles fossiles. La Figure II.1 montre que la consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de 44 % entre 2006 et 2030 [26].

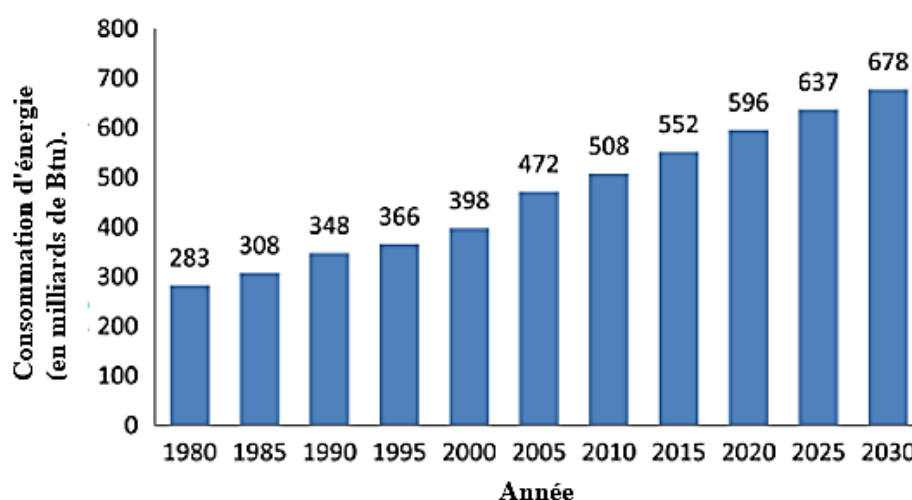


Figure II.1 Graphique de la consommation mondiale d'énergie prévue [26]

La demande mondiale de sources d'énergie propres et durables a suscité d'importants efforts de recherche et de développement dans le domaine de la technologie solaire photovoltaïque (PV). Les systèmes solaires photovoltaïques exploitent l'énergie abondante et renouvelable du soleil et la convertissent directement en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs [27]. Les technologies photovoltaïques sont devenues un domaine de recherche et de développement important grâce à un grand nombre de publications scientifiques et de brevets. Outre les technologies cellulaires, les composants de l'équilibre du système (BoS), tels que les panneaux, l'électronique et le stockage de l'énergie, constituent un domaine de recherche important [27].

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont modulaires et leur coût d'exploitation est faible car ils ne comportent pas de pièces mobiles. Les modules PV ont une durée de vie relativement longue et l'équilibre du système (BOS) ne nécessite qu'une maintenance mineure. Cependant,

les systèmes photovoltaïques souffrent d'un coût d'investissement initial élevé, d'un faible rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [28].

Le système photovoltaïque est un système électrique comprenant une série de composants interconnectés qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie solaire en électricité, utiliser l'énergie générée, la stocker ou l'inverser. En conséquence, un système photovoltaïque, qu'il soit centralisé, à l'échelle de l'utilité ou distribué, se compose de deux groupes principaux d'éléments : les cellules solaires et les technologies d'équilibre du système (BoS).

Les sources d'énergie renouvelables, en particulier la technologie solaire photovoltaïque (PV), ont connu une croissance remarquable à l'échelle mondiale ces dernières années, alors que les nations s'efforcent d'évoluer vers un avenir énergétique plus durable. La Figure II.2 présenté ici offre une visualisation convaincante de la capacité solaire photovoltaïque installée cumulée dans différentes régions du monde, sur la période 2010-2020.

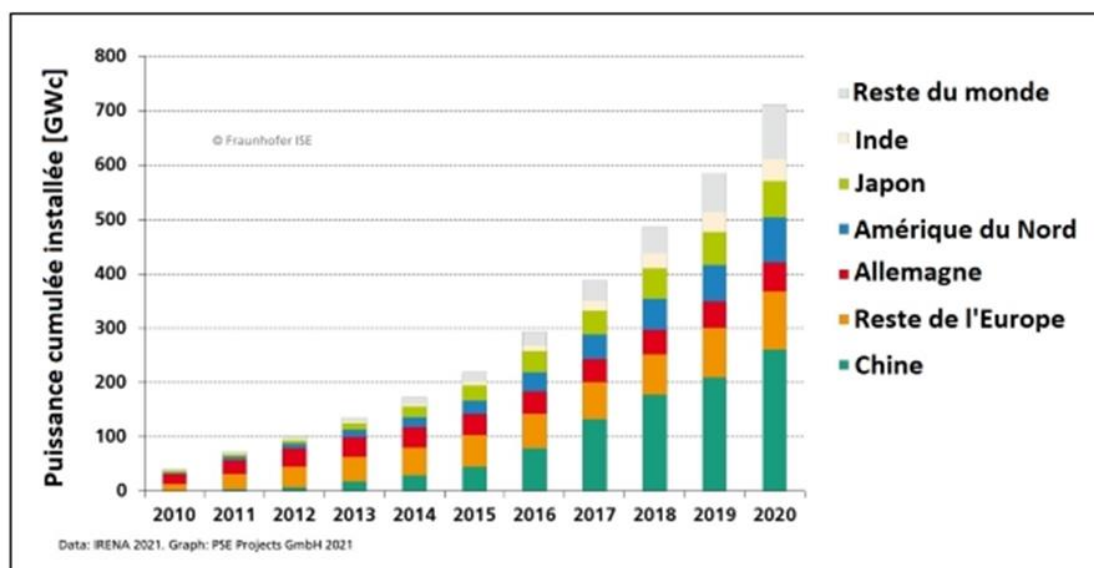


Figure II.2 La capacité solaire (PV) installée dans différentes régions du monde entre 2010 et 2020 [29]

II.2. Rayonnement solaire et potentiel énergétique

L'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques et autres qui convertissent la lumière du soleil en d'autres formes d'énergie utiles dépend de la connaissance des propriétés de la lumière du soleil. Le Soleil fournit de l'énergie nécessaire sous forme de rayonnement pour maintenir l'existence de la vie sur notre planète, Terre. En 1 heure, la Terre

reçoit suffisamment d'énergie du Soleil pour répondre à ses besoins énergétiques pendant près d'un an. Le Soleil est composé d'un mélange de gaz à prédominance d'hydrogène. Comme le Soleil convertit l'hydrogène en hélium dans une réaction de fusion thermonucléaire massive, la masse est convertie en énergie selon la célèbre formule d'Einstein, $E = mc^2$ [30]. À la suite de cette réaction, la surface du Soleil est maintenue à une température d'environ 5800 K. Cette énergie est rayonnée uniformément loin du Soleil dans toutes les directions.

Pour concevoir un système fonctionnant à l'énergie solaire, il faut d'abord quantifier l'énergie solaire disponible et il est important de reconnaître les définitions et les distinctions entre les trois termes connexes "rayonnement solaire", "irradiance solaire" et "insolation solaire".

La lumière du soleil se compose d'une large gamme de longueurs d'ondes, appelée spectre électromagnétique (EM). Ce spectre de l'irradiation solaire est principalement concentré dans la gamme de longueurs d'onde de 0,25 - 3,0 μm . Le spectre d'irradiation solaire donné est divisé en différentes bandes comme les UV (ultraviolettes), Visible et IR (infrarouge) sur la base de la longueur d'onde ; comme représenté sur la Figure II.3. Environ 48% de l'énergie totale se situe dans la 0,38 - 0,78 μm (bande visible), 46% de l'énergie se trouve dans la bande de 0,78 - 3,0 μm (IR) et seulement 6 % de l'énergie se situe dans la plage de 0,2 - 0,38 μm , c'est-à-dire dans la région UV [31].

La terre est entourée d'une atmosphère contenant divers gaz, de la poussière et d'autres particules en suspension, de la vapeur d'eau et des nuages de différents types. Le rayonnement solaire, lors de son passage dans l'atmosphère, est partiellement absorbé, diffusé et réfléchi dans différentes bandes de longueur d'onde de manière sélective, et plus la couche atmosphérique qui les pénètre est grande, plus il devient plus faible. Des réactions chimiques se produisent, jusqu'à ce que le spectre atteigne la surface de la terre, puis le spectre est défini entre les rayons infrarouges lointains et les rayons ultraviolets proches.

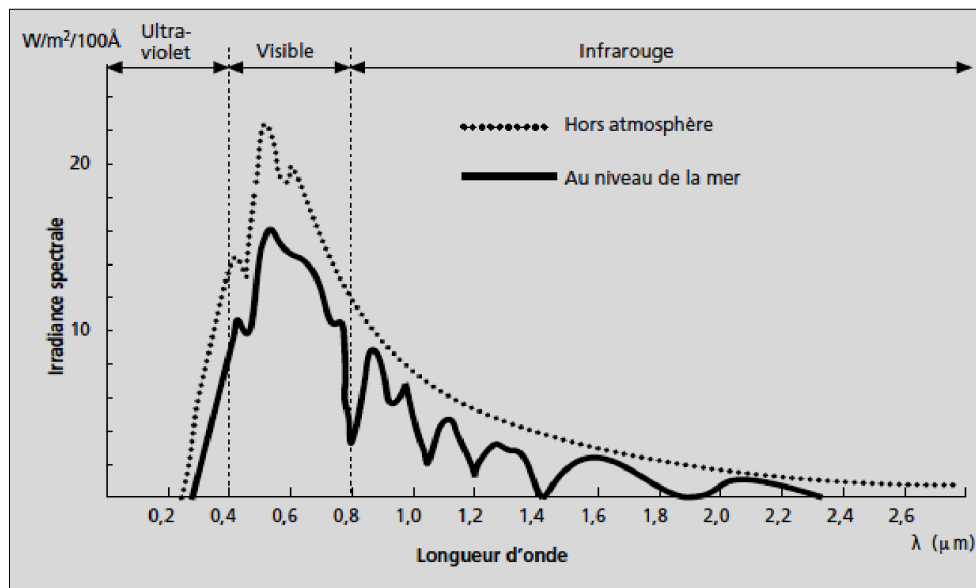


Figure II.3. Analyse spectrale du rayonnement solaire [32]

L'irradiance solaire ou la densité de flux rayonnant de la lumière du soleil (unité SI de W m^{-2}) peut être séparée en différentes composantes représentées dans la Figure II.4 [33] :

- ✚ Le rayonnement normal direct (DNI) : la lumière qui provient directement du soleil sans déviation de trajectoire. Elle est mesurée sur une surface perpendiculaire au soleil.
- ✚ Le rayonnement horizontal diffuse (DHI) : la radiance solaire mesurée sur une surface horizontale. Elle provient de la diffusion et de la réflexion multiples par les nuages, les aérosols et les molécules de l'atmosphère. Il comprend également la partie du rayonnement qui a été réfléchi par le sol et qui est diffusée par l'atmosphère en direction du plan horizontal.
- ✚ Irradiance horizontale globale (GHI) : le rayonnement solaire descendant total reçu par une surface horizontale par rapport au sol.

La constante solaire est la quantité de rayonnement solaire traversant une unité de surface au frontière externe de l'atmosphère, perpendiculairement à la direction du rayonnement à la distance moyenne Terre-Soleil. Sa valeur est de 1367 W/m^2 . La valeur réelle du rayonnement extraterrestre varie de $\pm 3.3\%$ au cours de l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil.

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière solaire et se mesure en W/m^2 . L'irradiance est donc une quantité instantanée et est souvent identifiée comme l'intensité de la lumière solaire.

L'irradiation est l'intégration sur une durée déterminée de l'irradiance (la densité énergétique de la lumière solaire) et se mesure en kWh/m². Normalement, la période d'intégration est d'un jour, ce qui signifie, bien sûr, pendant les heures de jour (les heures de clarté du jour).

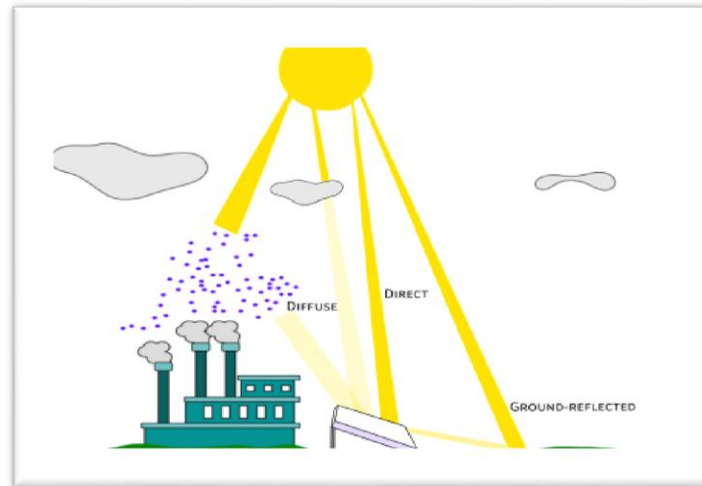


Figure II.4. Représentation schématique de l'irradiation directe, diffuse et réfléchie par le sol

[33]

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement de 1367 W/m² au sommet de l'atmosphère subit des déperditions, du fait de son absorption ou diffusion partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Cette longueur de trajet est généralement comparée à un trajet vertical directement au niveau de la mer, qui est désigné par la masse d'air = 1 (AM1). À AM1, une fois l'absorption prise en compte, l'intensité du rayonnement global est généralement réduite de 1367 W/m² au sommet de l'atmosphère à un peu plus de 1000 W/m² au niveau de la mer. Par conséquent, pour une longueur de trajet AM1, l'intensité de la lumière solaire est réduite à 70 % de sa valeur initiale AM0.

La Figure II.5 montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à 1.5 masse d'air. La définition de ce spectre de ciel clair, noté AM 1.5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Quand le soleil est à son point de zénith la distance à travers l'atmosphère est AM= 1(longueur minimale) et lorsque l'angle est de 60,1 degrés, ce chemin devient deux fois plus long et AM= 2.

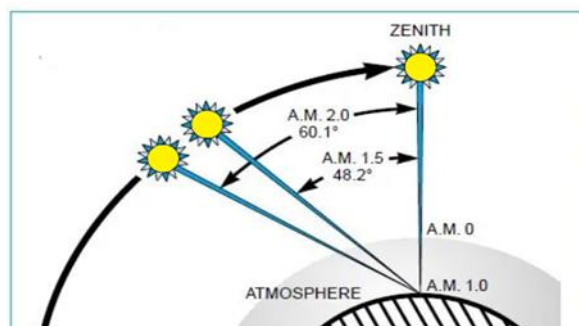


Figure II.5 Angle de zénith et Masse d'air (AM)

Vu sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). Sur une surface horizontale de 1 m² l'énergie reçue quotidiennement est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m².an au Nord et 2650 kWh/m².an au sud du pays. Le Tableau II.1 résume le potentiel solaire en Algérie [34].

Tableau II.1 Potentiel solaire en Algérie [34]

	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

II.3. Technologies des cellules photovoltaïques

Le photovoltaïque (PV) est la méthode de production d'énergie électrique qui consiste à convertir le rayonnement solaire incident en courant électrique continu à l'aide de semi-conducteurs. La transformation directe de la lumière en électricité est appelée « effet photovoltaïque ». L'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique, elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité [32].

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel entre des électrodes plongées dans un électrolyte à la lumière [35]. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux États-Unis, arrivèrent à fabriquer la première photopile (cellule), l'élément primaire d'un système photovoltaïque [32]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique (semi-conducteur) qui convertit directement la lumière du soleil en électricité. Pratiquement toutes cellules photovoltaïques comportent une jonction PN dans un semi-conducteur, qui développe une photo-tension [36]. La lumière qui brille sur la cellule solaire produit à la fois un courant et une tension pour générer de l'énergie électrique [37]. Une cellule solaire typique est représentée sur la Figure II.6.

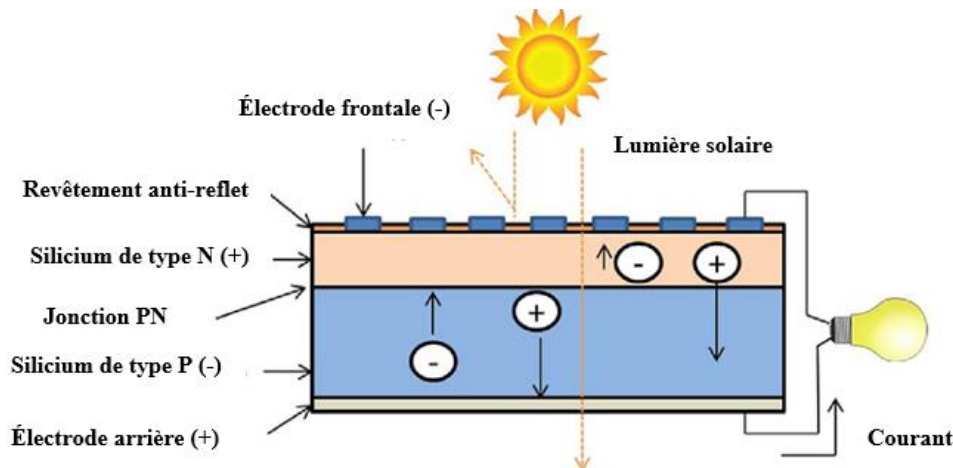


Figure II.6. Structure et fonctionnement des cellules solaires [36]

Les cellules solaires sont les composants de base des modules photovoltaïques, également appelés panneaux solaires. Les cellules solaires sont classées comme photovoltaïques, que la source de lumière soit naturelle ou artificielle. Ils sont utilisés comme photodétecteurs (par exemple, détecteurs infrarouges), pour détecter la lumière ou d'autres rayonnements électromagnétiques dans le domaine visible, ou pour mesurer l'intensité de la lumière [37].

Pour fonctionner, une cellule photovoltaïque (PV) doit présenter trois caractéristiques fondamentales [37]:

1. Absorption de la lumière qui entraîne la formation de paires électron-trou ou d'exactions.
2. La séparation des porteurs de charges opposées.
3. L'extraction de ces porteurs séparément vers un circuit externe.

Lorsque la lumière sous forme de photons frappe la cellule (la jonction p-n) (Figure II.7), l'énergie est transférée aux porteurs de charge présents dans la cellule. Les électrons se détachent de la bande de valence et passent dans la bande de conduction en surmontant l'énergie de la bande interdite, (E_g).

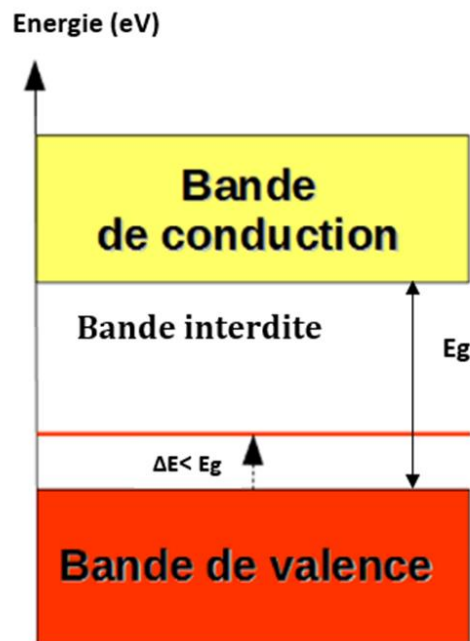


Figure II.7. Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs [38]

La bande de valence est la gamme la plus élevée d'énergies électroniques où les électrons ne sont pas libres de se déplacer, tandis que la bande de conduction est la gamme la plus basse d'énergies électroniques où les électrons sont libres de se déplacer. La bande interdite du silicium est de 1.12 eV. Autrement dit, les photons dont l'énergie est supérieure à 1.12 eV provoquent un courant dans la cellule, mais les photons dont l'énergie est inférieure à 1.12 eV passent sans être affectés. Le déplacement d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction crée un trou dans la bande de valence. Lorsqu'une cellule photovoltaïque est connectée à une charge, le flux de courant est causé par des électrons libres dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence [38].

Il existe aujourd'hui de nombreuses technologies de cellules photovoltaïques utilisant divers matériaux, et un nombre encore plus important sera disponible à l'avenir [39]. En fonction de la matière première utilisée et du niveau de maturité commerciale, les technologies des cellules photovoltaïques sont généralement classées en trois générations (Figure II.8)[36] :

- ✚ Systèmes photovoltaïques de première génération (entièrement commerciaux) qui utilisent la technologie du silicium cristallin (c-Si) dans ses formes cristallines simple (sc-Si) et multicristalline (mc-Si).
- ✚ Les systèmes photovoltaïques de deuxième génération sont basés sur les technologies photovoltaïques à couche mince et sont classés en trois grandes familles : (1) le silicium

amorphe (a-Si) et le silicium micro amorphe (a-Si / c-Si) ; (2) tellurure de cadmium (CdTe) ; et (3) le sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et le cuivre, indium, gallium et diétine (CIGS).

- Les cellules photovoltaïques organiques, également appelées cellules solaires organiques, sont un type de cellule solaire qui convertit la lumière du soleil en électricité à l'aide de matériaux organiques tels que des polymères et de petites molécules. Ces matériaux sont à base de carbone et peuvent être synthétisés en laboratoire, contrairement aux matériaux inorganiques tels que le silicium, qui nécessitent des opérations d'extraction et de traitement importantes. Ce type des cellules PV offrent une alternative durable et rentable aux cellules solaires traditionnelles, mais elles se heurtent à des problèmes d'efficacité, de durabilité et de concurrence [40].

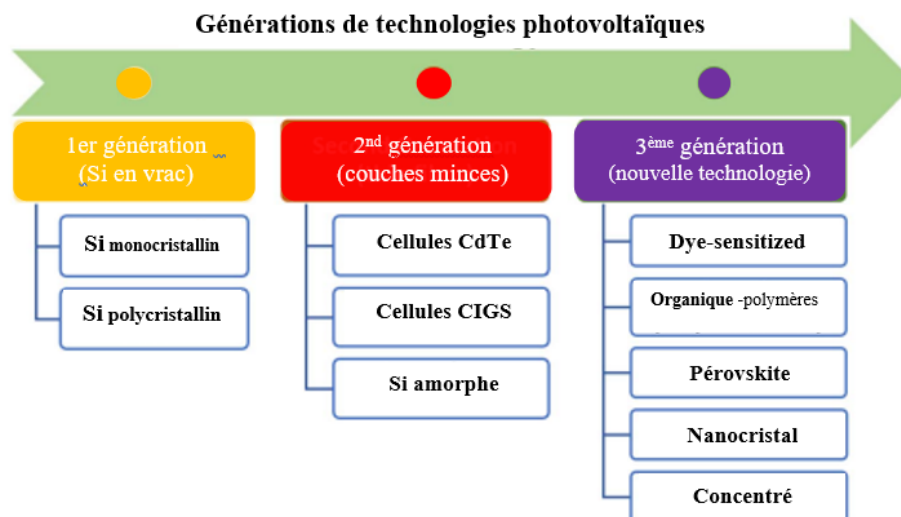


Figure II.8 La classification des technologies de cellules solaires PV [40]

Le comportement électrique d'une cellule PV est généralement représenté par un circuit équivalent composé d'une source de courant photoélectrique (I_{ph}) en parallèle avec une diode D (ou deux diodes pour une analyse plus détaillée), une résistance shunt (R_{sh}) et une résistance série (R_s) dans la branche de charge. Les fabricants utilisent le modèle de la diode unique (illustré à la Figure II.9) pour représenter les données PV [38].

Un modèle mathématique est utilisé pour simuler le courant du module photovoltaïque en fonction de la tension, ce modèle est dérivé de la recherche théorique et des modèles existants [41]. Les cellules et modules photovoltaïques sont actuellement disponibles en deux modèles principaux : simple diode et double diode. Les modèles à une seule diode se sont

révélés être un excellent compromis entre la précision du modèle et la complexité du calcul [42].

L'illumination d'une cellule solaire génère un courant proportionnel appelé courant photo généré. Il convient de noter que la quantité de courant et de tension disponible à partir de la cellule est affectée par le niveau d'éclairement de la cellule. Dans le cas idéal, l'équation caractéristique I-V est la suivante [30] :

$$I = I_{ph} + I_s \left[\exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Où I et V sont le courant et la tension aux bornes du cellule PV, I_{ph} est le courant photo généré produit par la cellule, I_s est le courant de saturation inverse de la diode et V_t est la tension thermique de la cellule définie comme suit :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.2})$$

Où k est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), q est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), et T est la température de la jonction p-n en Kelvin.

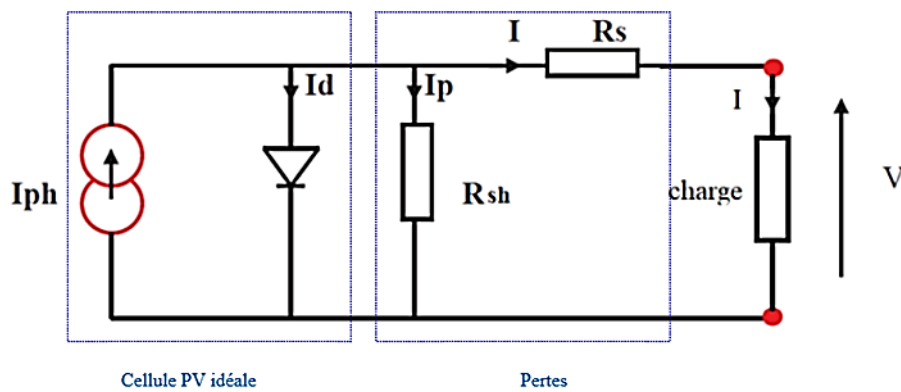


Figure II.9 . Modèle à une seule diode d'une cellule solaire PV [38]

La représentation précédente de la cellule est idéalisée, n'a pas pris en compte tous les phénomènes qui se produisent lors de la conversion de l'énergie lumineuse. Le schéma équivalent de la cellule solaire peut être complété en ajoutant deux résistances, une résistance série (R_s) pour tenir compte des pertes internes (tension en sortie) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}) pour les courants de fuite (Figure II.9). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule PV [32] :

- ✚ La résistance en série est la résistance interne de la cellule ; elle est déterminée principalement par la résistance du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des portes du collecteur et leur résistivité.
- ✚ La résistance de shunt est causée par un courant de fuite à la jonction, qui varie selon la façon dont il a été réalisé.

Si nous considérons qu'un modèle de module PV est une cellule unique avec des multiplicateurs incorporés dans le modèle de cellule en fonction du nombre de cellules connectées en série dans le module, alors pour un éclairage et une température donnée, la relation courant-tension du module PV est la suivante [43] :

$$I = I_{ph} + I_s \left[\exp \left(\frac{V+R_s I}{N_s n V_t} \right) \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Où N_s est le nombre de cellules PV connectées en série dans le module PV, n est le facteur d'idéalité de la diode.

Les caractéristiques I-V ($I=f(V)$) d'une cellule solaire sont illustrées dans la Figure II.10.

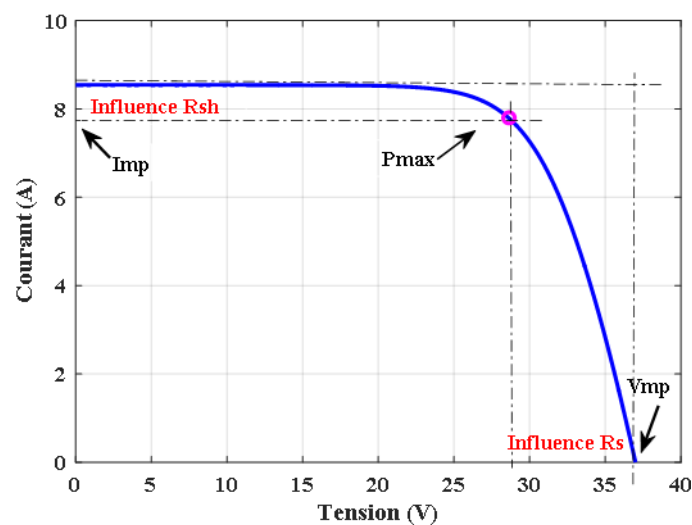


Figure II.10. Courbe caractéristique I-V d'une cellule PV

Ont défini sur cette courbe le suivant :

- ✚ Le courant de court-circuit I_{sc} ($V=0$) : Il suffit d'entrer $V = 0$ dans l'exposant pour calculer le courant de court-circuit d'une cellule PV idéale. Par conséquent, $I_{sc} = I_{ph}$. Le courant de la cellule est directement proportionnel à l'éclairement énergétique de la cellule, avec une très bonne approximation. Ainsi, si le courant de la cellule est connu dans des conditions

d'essai standard, $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$ à AM 1,5, le courant de la cellule pour toute autre irradiance, G , est donné par

$$I_{ph}(G) = \frac{G}{G_0} I_{ph}(G_0) \quad (\text{II.4})$$

✚ La tension de circuit ouvert V_{co} ($I=0$) : Elle est fonction des caractéristiques de la jonction P-N et des matériaux. Pour déterminer la tension en circuit ouvert de la cellule, le courant de la cellule est mis à zéro et l'équation (II.1) est résolue pour V_{OC} , ce qui donne le résultat suivant :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \cong \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.5})$$

Puisque normalement $I_{ph} \gg I_s$. Par exemple, si le rapport entre le photo-courant et le courant de saturation inverse est de 10^{10} , l'utilisation d'une tension thermique (kT/q) de 26 mV donne $V_{co} = 0,6 \text{ V}$. Il convient de noter que la tension en circuit ouvert ne dépend que de façon logarithmique de l'éclairage de la cellule, alors que le courant de court-circuit est directement proportionnel.

✚ La puissance de la cellule P_C : Dans un circuit à courant continu comme le cas d'une cellule PV, en multipliant le courant de la cellule par la tension de la cellule, on obtient la puissance de la cellule.

Mathématiquement,

$$P(\text{watts}) = V(\text{volts}) \times I(\text{ampers}) \quad (\text{II.6})$$

Il convient de noter qu'à tout niveau d'éclairage donné, il existe un point de la caractéristique I-V de la cellule où celle-ci produite une puissance maximale. Il est également intéressant de noter que la tension à laquelle les points de puissance maximale se produisent n'est que légèrement affectée par le niveau d'illumination de la cellule.

La Figure II.11 illustre les effets de l'irradiation et de la température de la cellule sur les caractéristiques des cellules.

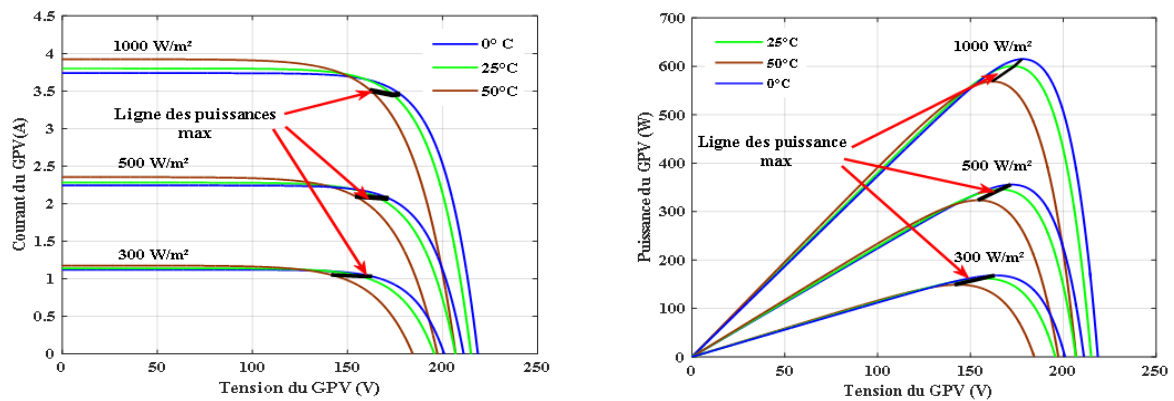


Figure II.11 Influence de l'irradiation et de la température des cellules sur les caractéristiques des cellules PV [44]

La Figure II.12 montre comment la courbe I-V change lorsque deux cellules identiques sont connectées en parallèle et en série. Comme on peut le constater, le fait de connecter deux cellules identiques en parallèle permet de maintenir la tension tout en doublant le courant ; En connectant les cellules en série, on maintient la tension tout en doublant le courant.

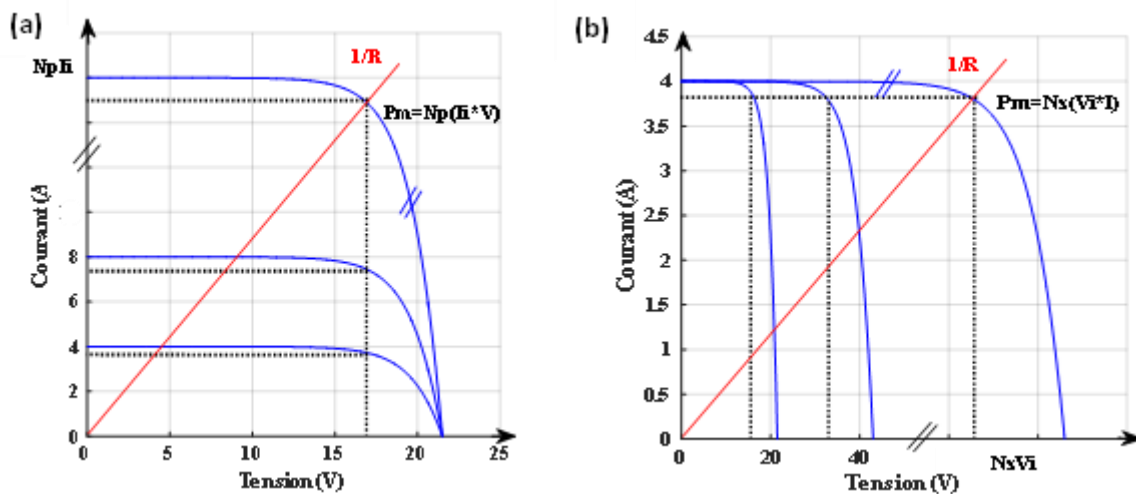


Figure II.12. Connexion en parallèle et en série de deux cellules solaires identiques. (a) Connexion en parallèle. (b) Connexion en série [44].

II.4. Les conditions STC et NOCT

Les conditions environnementales idéales pour un test standard d'une cellule photovoltaïque sont :

- ☀ Éclairement des cellules 1000 W/m² ;

- ✚ Spectre AM 1.5 ;
- ✚ Température des cellules 25 °C ;
- ✚ Vitesse du vent : 1 m/s.

Ces valeurs sont appelées STC (Standard Test Conditions) et elles sont utilisées par tous les fabricants pour définir leurs produits. Les conditions STC sont rarement rencontrées dans la réalité (sauf en hiver) parce que la température d'un module au soleil est en général plus élevée que 25°C [35].

Pour tenir compte de conditions plus réalistes et habituelles, les constructeurs de modules PV ont introduit une température typique des cellules sous les conditions suivantes :

- ✚ Éclairement des cellules 800 W/m² ;
- ✚ Spectre AM 1.5 ;
- ✚ Température ambiante 20 °C ;
- ✚ Vitesse du vent : 1m/s.

Cette valeur est appelée NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), c'est la température nominale (ou normale) d'utilisation des cellules photovoltaïques d'un module solaire et elle s'exprime en degrés Celsius (°C). La valeur moyenne du NOCT PV des modules solaire standards varie entre 45 et 50°C [35].

II.5. Composants des systèmes photovoltaïques

II.5.1. Panneau (Module) photovoltaïque

Comme mentionné ci-dessus, un module/panneau photovoltaïque peut être considéré comme se comportant comme une seule cellule solaire, de sorte que les propriétés électriques de la cellule sont les mêmes que celles du panneau. Afin d'obtenir des niveaux de puissance et de tension élevés les modules PV sont fabriqués en connectant des cellules PV en série. En outre, des diodes de dérivation sont installées dans les modules photovoltaïques pour éviter les ruptures par avalanche et les points chauds en cas d'ombrage partiel [42]. Pour concevoir un module PV de 12 volts, par exemple, il faut connecter en série 33 à 36 cellules. Les cellules sont maintenues en place par un couvercle rigide, transparent et étanche [31]. Les courbes I-V et P-V, le courant de court-circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , le facteur de remplissage FF et la puissance maximale de sortie P_{max} sont les caractéristiques électriques les plus importantes d'un module PV [45].

Le module PV est un dispositif non linéaire et peut être représenté par sa caractéristique I-V, en supposant que les cellules PV sont identiques, la caractéristique I-V du module PV est obtenue en fonction de l'irradiation globale et de la température de jonction [46]. La courbe représente conceptuellement les combinaisons de courant et de tension auxquelles la chaîne pourrait fonctionner ou être "chargée" si l'éclairement énergétique et la température de la cellule étaient maintenus constants [31]. Les Caractéristiques d'un module PV sont définis et modélisés comme suit [45].

La Figure II.13 montre une courbe typique I-V, la courbe puissance-tension ou P-V qui est calculée à partir de celle-ci, et les points clés de ces courbes.

Selon la Figure II.13 la courbe I-V s'étend du courant de court-circuit (I_{CC}) à zéro volt, au courant nul à la tension de circuit ouvert (V_{CO}). Le point de puissance maximale (I_{mp} , V_{mp}) d'une courbe I-V normale se trouve au "genou", c'est-à-dire au point où le réseau génère une puissance électrique maximale. Aux niveaux normaux d'irradiation solaire, le courant de court-circuit est équivalent au photo-courant I_{ph} , qui est proportionnel à l'irradiation solaire G (W/m^2).

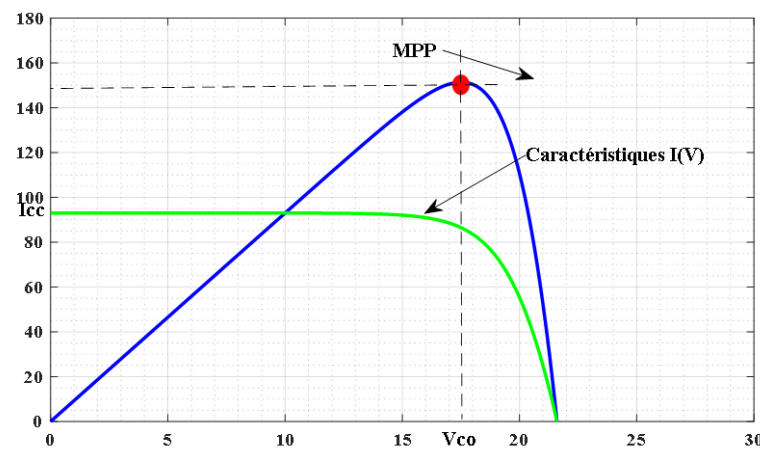


Figure II.13 Les courbes I-V et P-V d'un module photovoltaïque [45]

Le courant de court-circuit I_{CC} des modules PV ne dépend pas fortement de la température. Elle a tendance à augmenter légèrement avec l'augmentation de la température du module Pour les besoins de la performance des modules PV, la modélisation de cette variation peut être considérée comme négligeable. Alors, le courant de court-circuit I_{CC} peut être simplement calculé [45] :

$$I_{CC} = I_{CC(o)} \left(\frac{G}{G_o} \right)^a \quad (\text{II.7})$$

Où $I_{CC(o)}$ est le courant de court-circuit du module PV sous l'irradiation solaire standard G_o ;

I_{CC} est le courant de court-circuit du module PV sous l'irradiation solaire G ;

(a) est l'exposant responsable de tous les effets non linéaires dont dépend le photocourant.

La relation entre la tension en circuit ouvert et l'éclairement énergétique suit une fonction logarithmique basée sur une équation de diode idéale, et l'effet de la température est dû à une augmentation exponentielle du courant de saturation avec l'augmentation de la température, la tension en circuit ouvert V_{CO} dans des conditions données peut s'exprimer par [45]:

$$V_{CO(o)} = \frac{V_{COo}}{1+b \cdot \ln \frac{G_o}{G}} \left(\frac{T_o}{T} \right)^\gamma \quad (\text{II-8})$$

Où $V_{CO(o)}$ est la tension en circuit ouvert du module PV sous l'irradiation solaire standard G_o ; V_{CO} est la tension en circuit ouvert du module PV sous l'irradiation solaire normale G ; b est un coefficient sans dimension lié à la technologie spécifique du module PV ; et γ est l'exposant qui prend en compte tous les effets non linéaires température-tension.

Dans les caractéristiques I-V, il existe un point de sortie de puissance maximale (PPM). La performance des modules photovoltaïques est fortement influencée par l'irradiation solaire et la température du module PV. La performance d'un module PV est estimée à l'aide d'un modèle simplifié de sa puissance maximale. Il est donné par l'équation II.9.

$$P_{max} = FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}, \quad (\text{II.9})$$

Où I_{CC} et V_{CO} sont le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert du module solaire photovoltaïque, FF (sans dimension) est le facteur de remplissage. C'est le rapport entre la norme de puissance nominale et la norme de puissance maximale.

Le facteur de remplissage (FF) est une mesure de la qualité d'un module ou d'une chaîne PV. Il représente le caractère carré (ou "rectangulaire") de la courbe I-V, et est le rapport de deux zones définies par la courbe I-V, comme illustré à la Figure II.12.

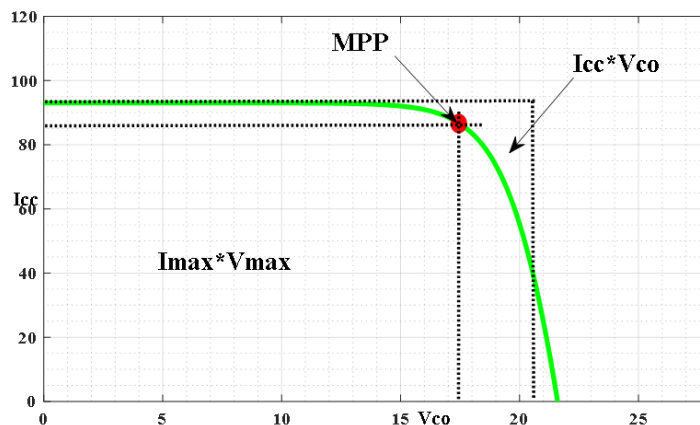


Figure II.14 Le facteur de remplissage, défini comme le rapport des surfaces des deux triangles [45]

Il irréalisable physiquement une technologie de module PV produirait une courbe I-V parfaitement rectangulaire dans laquelle le point de puissance maximale coïnciderait avec (I_{cc}, V_{CO}) , pour un facteur de remplissage de 1. Le facteur de remplissage est important car si les courbes I-V de deux modules PV individuels ont les mêmes valeurs de I_{cc} et V_{CO} , le générateur ayant le facteur de remplissage le plus élevé (courbe I-V carrée) produira plus de puissance. De même, toute déficience qui réduit le facteur de remplissage réduira la puissance de sortie. Si I_{mp} et V_{mp} représente respectivement le courant et la tension du module à la puissance maximale, le facteur de remplissage peut être exprimé par :

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{cc} \cdot V_{CO}} \quad (\text{II.10})$$

II.5.2. Batteries

Les batteries sont nécessaires dans de nombreux systèmes photovoltaïques pour fournir de l'énergie pendant la nuit ou lorsque le système photovoltaïque ne peut pas répondre à la demande. Le choix du type et de la taille de la batterie dépend principalement de la charge et des exigences de disponibilité. La principale exigence des batteries pour un système photovoltaïque est qu'elles doivent être capables d'accepter des charges et décharges profondes répétées sans dommage.

Les batteries sont classées en fonction de leur capacité nominale (q_{max}), qui est le nombre d'ampères-heures (Ah) pouvant être extraits au maximum de la batterie dans des conditions de décharge prédéterminées. Le rendement d'une batterie est le rapport entre la charge extraite

(Ah) pendant la décharge et la quantité de charge (Ah) nécessaire pour rétablir l'état de charge initial (SOC_{bat}). Le rendement dépend donc de l'état de charge et du courant de charge et de décharge. L'état de charge est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité nominale, c'est-à-dire

$$SOC_{bat} = \frac{q}{q_{max}} \quad (II.12)$$

Comme le montrent la définition précédente et l'équation (II.12), le SOC peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Si le $SOC_{bat} = 1$, la batterie est entièrement chargée ; et si le $SOC_{bat} = 0$, la batterie est totalement déchargée.

D'autres paramètres liés aux batteries sont le régime de charge ou de décharge et la durée de vie de la batterie. Le régime de charge (ou de décharge), exprimé en heures, est le paramètre qui reflète la relation entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel elle est chargée (ou déchargée). Par exemple, le régime de décharge est de 40 heures pour une batterie d'une capacité nominale de 200 Ah qui est déchargée à 5 A. La durée de vie de la batterie est le nombre de cycles de charge-décharge que la batterie peut supporter avant de perdre 20 % de sa capacité nominale.

En général, la batterie peut être considérée comme une source de tension, E , en série avec une résistance interne, R_o , comme le montre la Figure II.15. Dans ce cas, la tension aux bornes, V_{bat} , est donnée par :

$$V_{bat} = E - I_{bat}R_o \quad (II.13)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont respectivement la tension et le courant de la batterie.

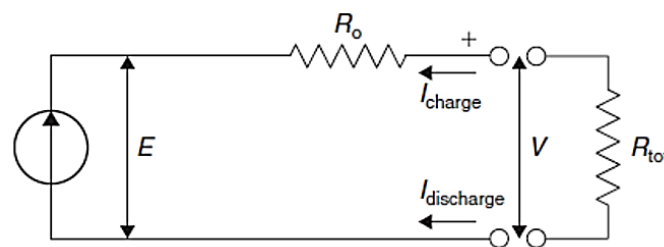


Figure II.15. Schéma de principe d'une batterie [47]

La source de tension E est en fonction de l'état de charge de la batterie (SOC) [48]. Il est recommandé de maintenir l'état de charge entre 20 % et 80 % pour éviter une hausse ou une

baisse importante de la tension de la batterie qui pourrait affecter sa durée de vie [49]. Gergaud et al. [50] ont suggéré que la limite inférieure devrait être de 30 % pour augmenter les performances et assurer un marche sûr de la batterie.

II.5.3. Onduleurs

Afin de convertir le courant continu en courant alternatif un onduleur est nécessaire. La sortie de l'onduleur peut être monophasée ou triphasée. Les onduleurs sont classés en fonction de leur capacité de puissance totale, qui va de quelques centaines de watts à des mégawatts. Certains onduleurs ont une bonne capacité de surtension pour le démarrage des moteurs, tandis que d'autres ont une capacité de surtension limitée. Le concepteur doit spécifier le type et la taille de la charge que l'onduleur doit desservir.

L'onduleur est caractérisé par un rendement dépendant de la puissance η_{inv} . Outre la transformation du courant continu en courant alternatif, la fonction principale de l'onduleur est de maintenir une tension constante du côté AC et de convertir la puissance d'entrée, P_e , en puissance de sortie, P_s , avec le rendement le plus élevé possible, donné par :

$$\eta_{inv} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{V_{ac} I_{ac} \cos(\varphi)}{V_{dc} I_{dc}} \quad (\text{II.14})$$

Où $\cos(\varphi)$ est le facteur de puissance ; I_{dc} , le courant requis par l'onduleur du côté DC, c'est-à-dire le régulateur (A) ; et V_{dc} , la tension d'entrée pour l'onduleur du côté DC, c'est-à-dire le régulateur (V).

Le rendement d'un onduleur dépend de la fraction de sa puissance nominale à laquelle il fonctionne. L'efficacité de l'onduleur atteint son maximum, supérieur à 90 %, pour un niveau de puissance d'entrée généralement compris entre 30 et 50 % de sa capacité nominale. Lorsqu'un module PV est ombragé, le courant de sortie PV diminue considérablement, ce qui entraîne non seulement une baisse de la puissance de sortie du module, mais aussi une baisse de la puissance de sortie, ce qui affecte les performances de l'onduleur [51].

Les performances d'un onduleur dépendent de son point de fonctionnement, du seuil de fonctionnement, de la forme d'onde de sortie de l'onduleur, de la distorsion harmonique et de la fréquence, du rendement photovoltaïque, du dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et du transformateur. Les principales fonctions d'un onduleur sont la mise en forme de l'onde, la régulation de la tension de sortie et le fonctionnement à proximité des

points de puissance maximale. Les trois principaux types d'onduleurs sont l'onde sinusoïdale, l'onde sinusoïdale modifiée et l'onde carrée. Le principal avantage d'un onduleur sinusoïdal est que la plupart des appareils sont conçus pour un fonctionnement sinusoïdal. Un onduleur sinusoïdal modifié a une forme d'onde plus proche de l'onde carrée, mais avec une étape supplémentaire, il peut également fonctionner avec la plupart des appareils. Enfin, un onduleur à ondes carrées ne peut généralement faire fonctionner que des appareils simples avec des moteurs universels, mais son principal avantage est qu'il est beaucoup moins cher que l'onduleur à ondes sinusoïdales. En outre, à l'aide d'un filtre de puissance, la forme d'onde carrée de sortie peut être convertie en forme d'onde sinusoïdale.

II.5.4. Contrôleurs de charge

Les contrôleurs régulent la puissance des modules photovoltaïques afin d'éviter une surcharge des batteries. Le contrôleur peut être de type shunt ou de type série et fonctionne également comme un dispositif de déconnexion en cas de tension faible de la batterie afin d'éviter une décharge excessive (Figure II.16). Le régulateur est choisi en fonction de sa capacité et des caractéristiques souhaitées [47].

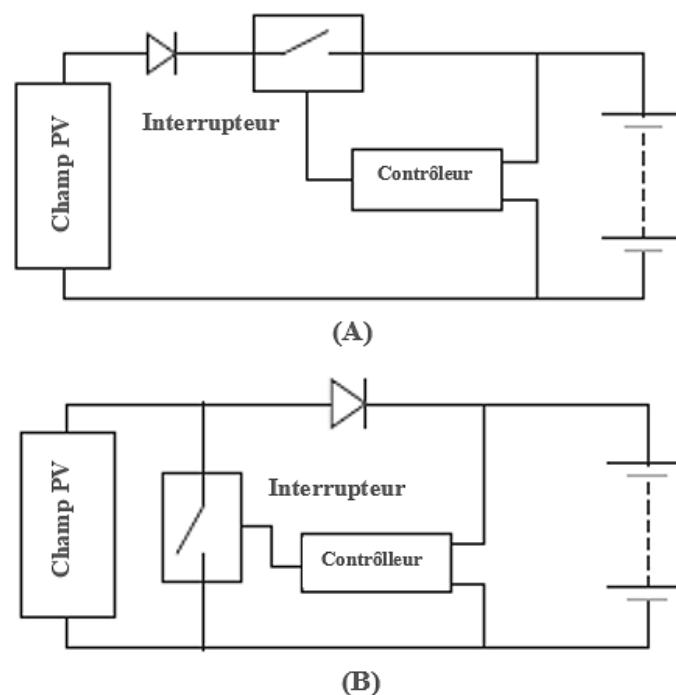


Figure II.16. (A) Régulateur à commutation série ; (B) Régulateur à commutation shunt [47]

Normalement, les contrôleurs permettent à la tension de la batterie de déterminer la tension de fonctionnement d'un système photovoltaïque. Cependant, la tension de la batterie

peut ne pas correspondre à la tension de fonctionnement optimale du système photovoltaïque. Certains contrôleurs peuvent optimiser la tension de fonctionnement des modules photovoltaïques indépendamment de la tension de la batterie, de sorte que le système photovoltaïque fonctionne à son point de puissance maximale.

Tout système électrique comprend un contrôleur et une stratégie de contrôle, qui décrit les interactions entre ses composants. Dans les systèmes photovoltaïques, l'utilisation de batteries comme moyen de stockage implique l'utilisation d'un contrôleur de charge. Celui-ci est utilisé pour gérer le flux d'énergie du système PV vers les batteries et la charge en utilisant la tension de la batterie et ses valeurs maximales et minimales acceptables. La plupart des régulateurs ont deux modes de fonctionnement principaux [47]:

- 1) Condition de fonctionnement normal, où la tension de la batterie varie entre les valeurs maximales et minimales acceptables.
- 2) Condition de surcharge ou de surdécharge, qui se produit lorsque la tension de la batterie atteint une valeur critique.

II.5.5. Traqueurs de puissance maximale

Comme nous l'avons vu précédemment, les cellules photovoltaïques ont un point de fonctionnement unique où les valeurs du courant (I) et de la tension (V) de la cellule produisent une puissance maximale. Ces valeurs correspondent à une résistance particulière, qui est égale à V/I , comme le précise la loi d'Ohm. Une cellule photovoltaïque présente une relation exponentielle entre le courant et la tension, et il n'existe qu'un seul point de fonctionnement optimal, également appelé point de puissance maximale (PPM), sur la courbe puissance-tension (ou courant), comme le montre la Figure II. 14. Le PPM varie en fonction de l'intensité du rayonnement et de la température de la cellule, comme le montre la Figure II. 11. Les suiveurs de point de puissance maximale (MPPT) utilisent un certain type de circuit de commande ou de logique pour rechercher ce point et, ainsi, permettre au circuit convertisseur d'extraire la puissance maximale disponible d'une cellule. En fait, les suiveurs de puissance de crête optimisent la tension de fonctionnement d'un système photovoltaïque pour maximiser le courant. En général, la tension du système photovoltaïque est chargée automatiquement. Les suiveurs simples de puissance de crête peuvent avoir des points de consigne fixes sélectionnés par l'opérateur.

II.6. Champ solaire photovoltaïque

Si des tensions ou des courants plus élevés que ceux que peut fournir un seul module sont nécessaires, les modules doivent être connectés en réseau. Des tensions plus élevées sont produites par des connexions en série, tandis que des courants plus élevés sont produits par des connexions en parallèle. Lorsque les modules sont connectés en série, il est préférable que la production maximale de puissance de chaque module se produise au même courant que dans le cas des cellules [30].

La Figure II.17 montre un générateur PV avec des branches parallèles M_P , chacune avec des modules M_S en série. Si un exposant G pour désigner les caractéristiques du réseau est utilisé, la tension appliquée aux bornes du réseau est notée V^G , tandis que le courant total du réseau est noté I^G , donné par [47] :

$$I^G = \sum_{i=1}^{M_P} M_i I_i \quad (\text{II.15})$$

Et si les modules sont supposés identiques et que l'irradiation ambiante est la même dans tous les modules, le courant du réseau est donné par :

$$I^G = M_P I^M \quad (\text{II.16})$$

Où I^M est le courant du module PV.

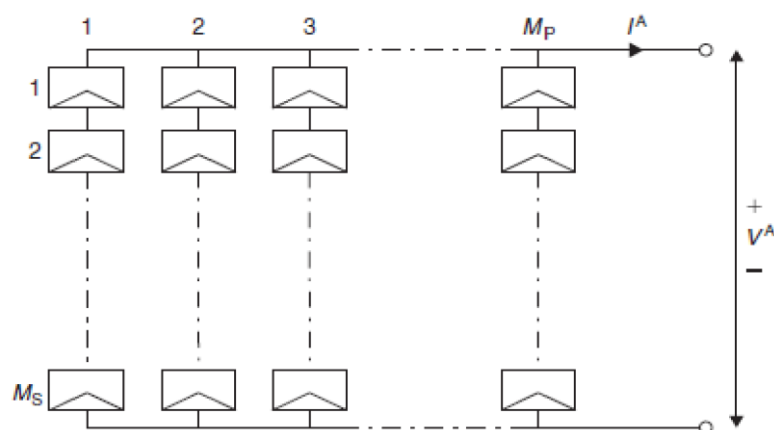


Figure II.17 Générateur de cellules composé de branches parallèles M_P , chacune avec des modules M_S en série [47]

II.7. Systèmes photovoltaïques et stockage d'énergie

Un système solaire photovoltaïque typique se compose de quatre éléments de base : Le module photovoltaïque, le contrôleur de charge, l'onduleur et la batterie si nécessaire (Figure II.18). Comme on peut le voir, le panneau photovoltaïque produit de l'électricité, qui peut être dirigée par le contrôleur vers un stockage sur batterie ou une charge. Lorsqu'il n'y a pas de soleil, la batterie a le rôle de fournir une alimentation à la charge si elle a une capacité satisfaisante. Le contrôleur a pour fonction d'empêcher les batteries d'être surchargées ou de se décharger complètement, augmentant ainsi leur durée de vie utile. L'onduleur est responsable de la conversion de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques au courant alternatif (niveaux de tension AC et fréquence du réseau). Généralement, dans les systèmes photovoltaïques les batteries sont utilisées pour stocker le surplus produit par les modules afin de l'utiliser la nuit ou les jours de faible ensoleillement ou de ciel couvert [36].

II.7.1. Les systèmes photovoltaïques avec batterie

Les batteries sont essentielles pour le fonctionnement des appareils électroniques et sont largement utilisées pour alimenter les appareils lorsqu'il n'y a pas d'alimentation principale disponible. Les batteries sont utilisées dans les ressources énergétiques non conventionnelles pour stocker l'énergie afin de pouvoir l'utiliser à tout moment, en plus des applications générales.

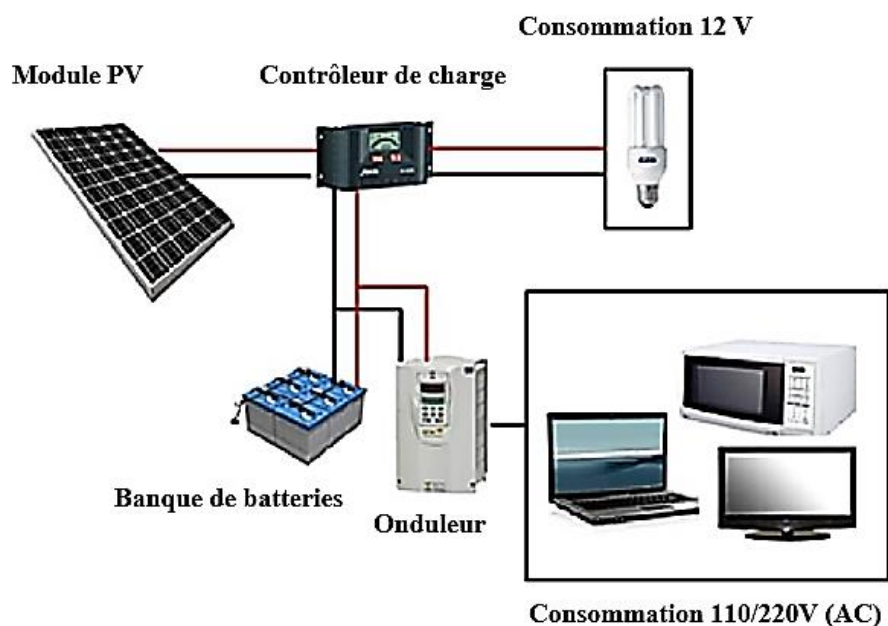


Figure II.18. Système typique d'énergie solaire photovoltaïque [36]

Un système photovoltaïque avec batterie comprend généralement les composantes de base suivantes [32] :

- ✚ Un champ de modules PV charge la batterie de stockage en période d'ensoleillement ;
- ✚ Une batterie alimente la charge si nécessaire et assure un stockage de l'énergie électrique ;
- ✚ Une diode anti-retour, son rôle est d'éviter la décharge de la batterie à travers les modules PV en période d'obscurité ;
- ✚ Un régulateur de charge qui protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par le champ de modules PV et aussi inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie ;
- ✚ Un conditionneur de charge permettant l'utilisation d'appareil à courant continu à tension variée (convertisseur) ou à courant alternatif (onduleur).

Les caractéristiques de ces composants doivent être parfaitement comprises pour déterminer la plage de fonctionnement du système et à partir desquelles les dimensions de chaque composant doivent être déterminées en fonction des limitations techniques de ce système. Ainsi, en étudiant les courbes (I-V) du champ de modules, de la batterie et de la charge, il est clair que la tension du système sera chargée par la batterie quelle que soit la puissance fournie par le module. En effet, le point de fonctionnement du champ de modules est déterminé par l'intersection des deux courbes représentant la courbe de charge de la batterie et la courbe de fonctionnement (I-V) du champ de modules à différents ensoleillements. une bonne adaptation sera obtenue lorsque la courbe de charge de la batterie sera dans la zone des puissances optimales du module sous différents ensoleillements [32].

La Figure II.19 montre une courbe I-V d'un module de 50 Wc et d'une batterie de 12 volts où le module aura normalement besoin de 36 cellules pour charger une batterie de 12 volts si prenant en compte les pertes dues au câble, à l'échauffement des cellules, à une diode de protection et à la batterie elle-même.

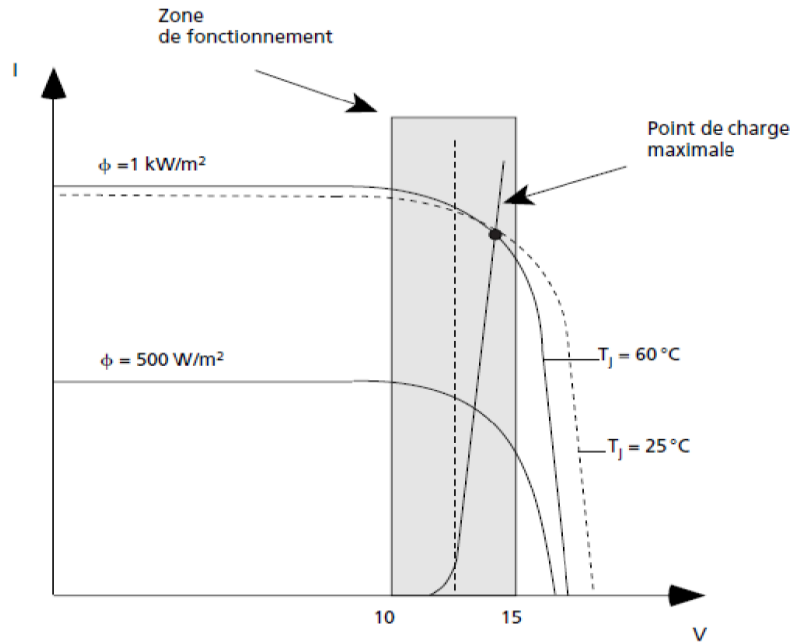


Figure II.19. Courbe I-V d'un module de 50 Wc et d'une batterie de 12 volts [32].

La batterie dans un système photovoltaïque remplit trois fonctions importantes [32] :

- ✚ **Autonomie.** Une batterie peut répondre aux besoins de la charge à tout moment, y compris la nuit et par temps nuageux.
- ✚ **Courant de surcharge.** Pendant quelques instants, une batterie peut fournir un courant de surcharge, c.-à-d. un courant plus élevé que celui que le champ photovoltaïque peut fournir. Ceci est nécessaire pour démarrer les moteurs et autres appareils qui nécessitent un courant de démarrage trois à cinq fois supérieur au courant de fonctionnement.
- ✚ **Stabilisation de la tension.** Une batterie fournit une tension constante, ce qui élimine les variations de tension dans le champ photovoltaïque et permet aux appareils de fonctionner à une tension optimisée.

La batterie de type plomb-acide est très connue par son utilisation dans les automobiles. Le tableau illustré dans la figure 3 rappelle les différences principales entre les batteries solaire et de démarrage, aussi présente les caractéristiques les plus recherchées d'une batterie solaire, à savoir, un rendement élevé, une grande durée de vie avec un grand nombre de cycles et une autodécharge faible [35].

Tableau II.2 Caractéristiques les plus recherchées d'une batterie solaire comparées à celle de démarrage

[35]

Caractéristique	Batterie
-----------------	----------

	Solaire	Démarrage
Courant	<< capacité	> capacité
Rendement	Élevé	Moyen
Cyclable	Oui	Faible
Autodécharge	Faible	Moyenne

II.7.1.1. Système PV autonome

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés dans des zones qui ne sont pas facilement accessibles ou qui n'ont pas accès à un réseau électrique. Un système autonome est indépendant du réseau électrique, l'énergie produite est généralement stockée dans des batteries. Ici une annulation d'une partie répétée du paragraphe. La Figure II.18 montre une vue schématique d'un système PV autonome.

II.7.1.2. Système à connexion hybride avec stockage

Dans le système à connexion hybride, plus d'un type de générateur d'électricité est utilisé. Le deuxième type de générateur d'électricité peut être renouvelable, tel qu'une éolienne, ou conventionnel, tel qu'un générateur à moteur diesel ou le réseau électrique. Le générateur à moteur diesel peut également être une source d'électricité renouvelable lorsque le moteur diesel est alimenté en biocarburants. La Figure II.21 présente le schéma d'un système à connexion hybride avec stockage dans les batteries. Encore une fois, dans ce système, les charges continues et alternatives peuvent être satisfaites simultanément [47].

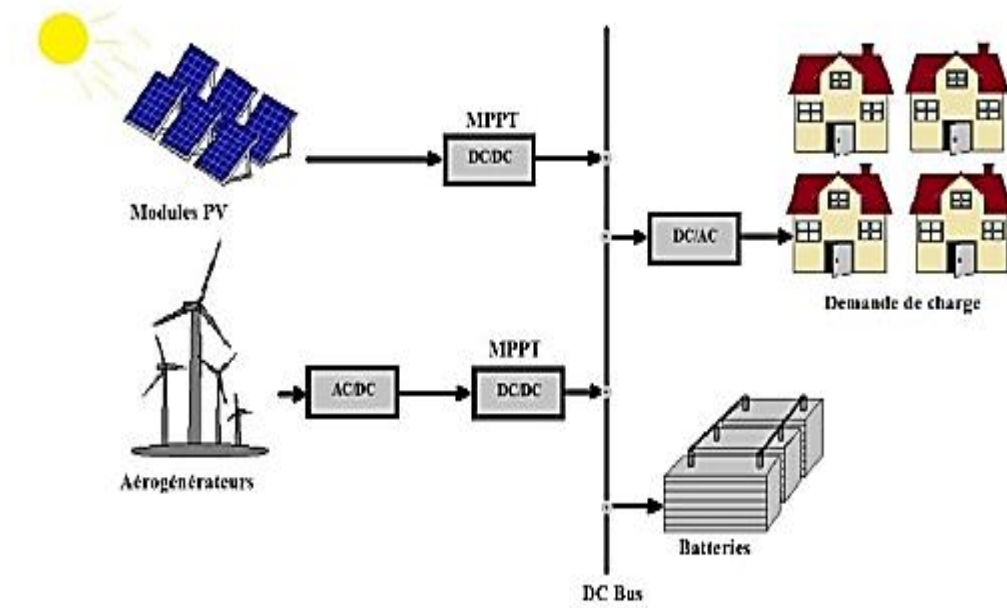


Figure II.20. Vue schématique d'un système PV hybride [52]

II.7.2. Les systèmes photovoltaïques sans batterie

Les systèmes photovoltaïques sans batteries sont généralement utilisés pour alimenter une seule charge qui convient mieux à une autre forme de stockage d'énergie que l'électricité (par exemple, une cellule solaire), ou qui ne nécessite de l'énergie que pendant la journée (par exemple, un réservoir d'eau élevé).

Certains types de charges ne sont pas adaptés au couplage direct des modules en raison des caractéristiques I-V des systèmes photovoltaïques. Pour obtenir une bonne correspondance, connectez une charge dont la caractéristique I-V est aussi proche que possible de la courbe de puissance maximale du système solaire, qui, comme nous l'avons vu, est pratiquement verticale autour d'une tension optimale. Cette contrainte est bien respectée par l'utilisation d'une batterie car sa caractéristique de fonctionnement est toujours très proche du point de fonctionnement maximal des modules (Figure II.22a). En revanche, la connexion directe d'une charge résistive à un module dont le rayonnement solaire est variable est hautement indésirable (voir la Figure II.22b). Si la puissance fournie à la charge est maximale pour un rayonnement solaire, elle ne l'est pas pour un autre. Les courbes en pointillés des Figures II.22a et II.22b représentent la caractéristique d'une charge idéale lorsque la puissance demandée correspond à la puissance maximale fournie par le système PV.

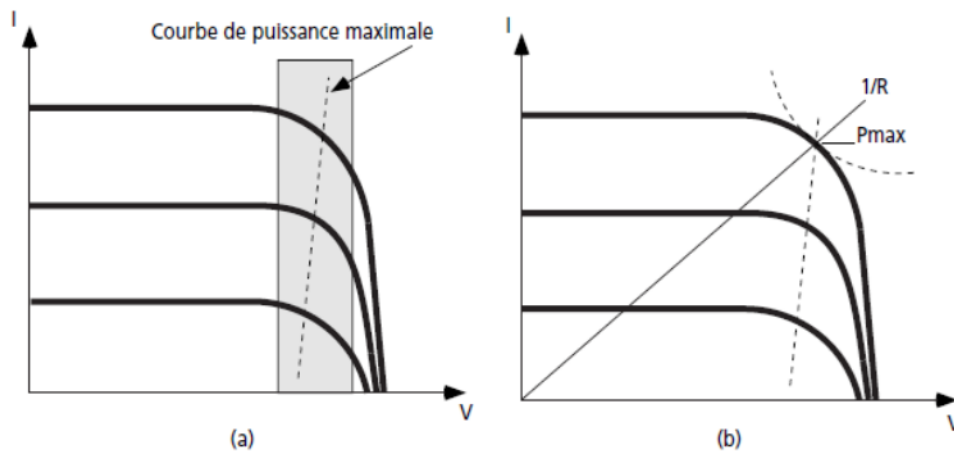


Figure II.21 Point de fonctionnement d'un champ PV couplé à a) une batterie, b) une charge résistive [32]

Dans un système PV à couplage direct, le générateur PV est connecté directement à la charge. Par conséquent, la charge ne peut fonctionner que lorsqu'il y a un rayonnement solaire, ce qui fait que les applications d'un tel système sont très limitées. Le schéma d'un tel système est présenté à la Figure II.23. Une application typique de ce type de système est le pompage de l'eau, c'est-à-dire que le système fonctionne tant que l'ensoleillement est disponible, et au lieu de stocker de l'énergie électrique, on stocke généralement de l'eau.

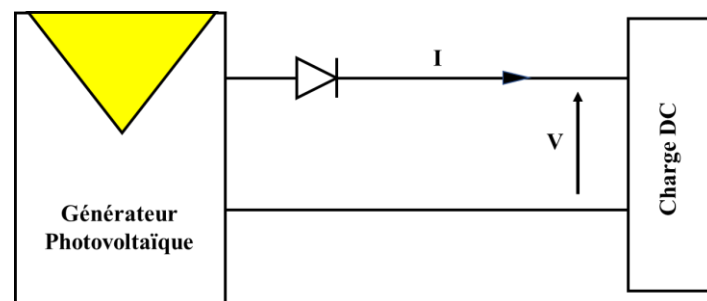


Figure II.22 Schéma d'un système PV à couplage direct

Les systèmes PV dont l'énergie est directement injectée dans le réseau électrique sont généralement appelés systèmes PV connectés au réseau. Ces systèmes sont également appelés systèmes photovoltaïques en réseau ou reliés au réseau. Ces systèmes photovoltaïques sont capables d'alimenter le réseau en énergie selon les deux cas soit vente totale de l'énergie ou vente des excédents (Figure II.24). Un système PV typique connecté au réseau est composé de modules PV, d'un onduleur, d'un transformateur et d'un compteur électrique.

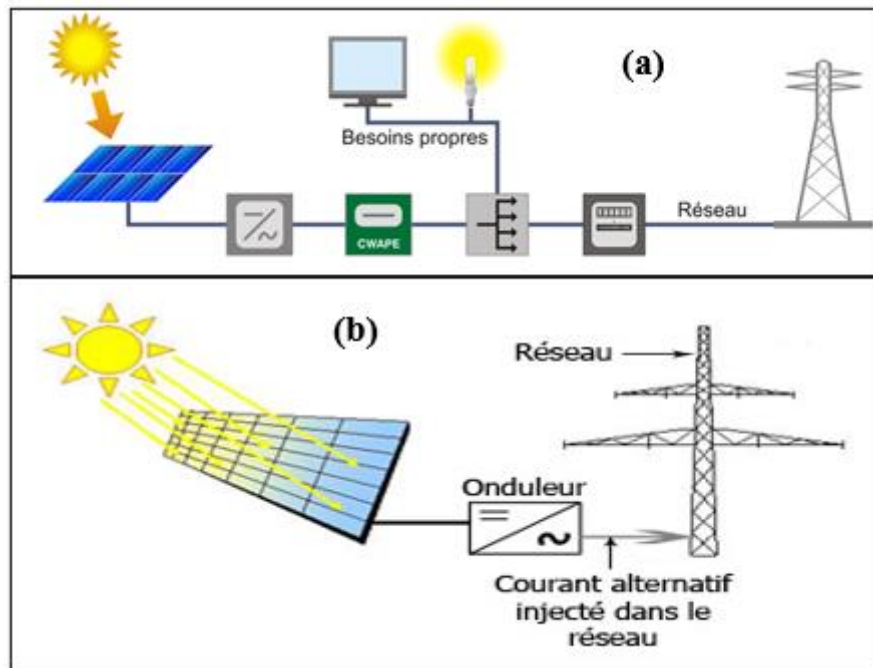


Figure II.23. Système PV connecté au réseau : (a) vente des excédents (b) vente totale

II.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté quelques notions sur le gisement solaire et également la découverte du potentiel solaire de l'Algérie. En explorant les cellules photovoltaïques, de l'effet de base aux diverses technologies, nous nous sommes penchés sur les conditions, la modélisation et les composants du système. En explorant les générateurs photovoltaïques et la dynamique des batteries, ce chapitre établit les bases d'une application pratique de l'énergie solaire. En conclusion, ces idées ouvrent la voie au voyage empirique à venir, où la théorie rencontre la pratique dans l'optimisation de l'irrigation par pivot central grâce à l'intégration de l'énergie solaire.

Chapitre III

*Conception et dimensionnement des pivots
solaires*

Chapitre III : Conception et dimensionnement des pivots solaires

III.1. Introduction

Alors que les préoccupations mondiales en matière d'énergie durable s'intensifient, les systèmes solaires apparaissent comme des solutions viables pour diverses applications, notamment l'irrigation agricole. L'introduction des systèmes à pivot solaire jouent un rôle essentiel pour les pratiques agricoles durables. Il est essentiel de comprendre les principes et les facteurs qui influencent la conception et le dimensionnement des pivots solaires pour améliorer la productivité agricole tout en minimisant l'impact sur l'environnement.

L'irrigation est essentielle pour maintenir la productivité agricole dans les environnements aride ou semi-aride, et les pivots centraux, en raison de leur polyvalence et de leur robustesse, sont les systèmes d'irrigation les plus utilisés [8]. Pour assurer l'accès à l'eau, il est nécessaire d'utiliser des systèmes de pompage appropriés et de leur fournir suffisamment d'énergie pour fonctionner. Avec l'augmentation des crises d'électricité dans les zones rurales et isolées, le système de pompage solaire PV (SPSPV) a gagné en popularité en raison de son autonomie et de sa non-dépendance à l'égard d'autres sources d'énergie telles que le diesel et le réseau électrique. Il existe différentes conceptions pour développer le système de pompage solaire, mais dans la plupart des cas, on utilise un système de pompage d'eau alimenté par des panneaux photovoltaïques [53]. La mise en œuvre du pompage solaire de l'eau est observée dans divers types d'applications, qui ont prouvé qu'il contribuait non seulement à l'équilibre écologique, mais aussi à l'amélioration de la croissance socio-économique [53].

Un certain nombre d'études ont été menées sur l'évaluation des performances, l'optimisation, les techniques de dimensionnement, l'amélioration de l'efficacité et les facteurs affectant les performances du système, les aspects économiques et environnementaux des SPSPV[54]. A cet égard, tous les composants de base du les systèmes de pompage d'eau à l'énergie solaire ont été étudiés indépendamment afin de développer un système avec une efficacité globale accrue. Les progrès de la recherche, dans ce domaine, se sont concentrés sur le système de collecte solaire, la pompe à eau, la hauteur manométrique de pompe, les systèmes de contrôle et le système d'acquisition de données, ainsi que sur la maintenance de ces composants et systèmes [55].

Dans un système de pompage solaire, le générateur photovoltaïque est le composant principal et coûteux pour ce type de système, c'est pourquoi l'amélioration de son efficacité et la réduction de son coût sont des paramètres importants pour la promotion future de la technologie de pompage photovoltaïque. Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans le domaine des matériaux et de l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires [56].

Les pompes alimentées par l'énergie solaire photovoltaïque sont des systèmes électromécaniques complexes qui comprennent des équipements hydrauliques, des machines électriques, des capteurs, des convertisseurs de puissance et des unités de contrôle [57]. Ces composants de base utilisés dans les SPSPV appartiennent à différents domaines de l'ingénierie. La pompe à eau et le système de suivi utilisés relèvent de la mécanique, le panneau photovoltaïque, l'onduleur DC-AC, le contrôleur de pompe, le contrôleur de charge et les batteries relèvent de l'électricité et de l'électronique ; les différents algorithmes utilisés dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT) relèvent de l'ingénierie informatique [58].

Cependant, compte tenu de l'introduction de l'énergie solaire PV pour l'irrigation de surface et goutte à goutte à basse pression, il existe encore très peu de publications pour le pompage PV à débit et pression constants, comme ceux qui utilisent des pivots pour l'irrigation. Bien que la recherche sur ce sujet soit limitée, nous mentionnerons ici les plus importants de ces travaux limités. En 2015, H.F. Ahmed et W. Helgason [59] ont conçu une méthodologie visant à évaluer la viabilité technique et économique d'un système d'irrigation solaire à pivot central dans des contextes environnementaux spécifiques. Leur approche intègre divers éléments tels que les attributs du système à pivot central, les besoins en eau des cultures, les conditions d'humidité du sol, les variables climatiques, les pratiques de gestion, ainsi que les performances des générateurs photovoltaïques (PV) et des batteries. V. Roy et al. [60] ont proposé une solution hybride d'énergie renouvelable pour améliorer la gestion de la charge d'un système d'irrigation à pivot central desservant des fermes éloignées à Lubbock, au Texas. Leur proposition comprenait l'intégration d'une éolienne et d'un module photovoltaïque, ainsi que l'inclusion d'un générateur diesel et d'une batterie de stockage comme sources de secours pour répondre à la capacité requise du système.

Herraiz et al. [61] leur recherche se concentre sur l'évaluation des performances d'un système d'irrigation photovoltaïque à pression constante et à pivot central, qui est un nouveau développement pour lequel il n'existe pas de données expérimentales suffisantes. L'étude prend

en compte divers indicateurs de performance et identifie les événements significatifs et les arrêts pour calculer les ratios d'utilisation et les ratios de performance (PR).

Ce chapitre se penche sur une analyse complète de divers aspects critiques liés aux systèmes d'irrigation à pivot solaire. Il commence par une évaluation des besoins en eau des cultures, fournissant une compréhension fondamentale des besoins en eau essentiels pour des pratiques d'irrigation efficaces. Ensuite, il aborde le dimensionnement des systèmes de pompage solaire PV, en mettant en évidence le processus complexe de détermination de l'équipement approprié pour répondre efficacement aux demandes d'irrigation. Ensuite, le chapitre explore les subtilités de la conception des pivots solaires, et enfin, il aborde le sujet crucial de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie pour l'irrigation, en soulignant les stratégies visant à minimiser le gaspillage des ressources et à promouvoir des pratiques agricoles durables.

III.2. Evaluation des besoins en eau

III.2.1. Évapotranspiration de référence (ET₀)

Dans les plantations, la transpiration (eau perdue à la surface de la plante) et l'évaporation (eau perdue au niveau de la surface du sol) se produisent en même temps et, lorsqu'elles sont combinées, sont appelées évapotranspiration du plante (ET). Dans la Figure III.1, la répartition de l'évapotranspiration en évaporation et transpiration est représentée en correspondance avec la surface foliaire par unité de surface de sol en dessous. Au moment de l'ensemencement, près de 100 % de l'ET provient de l'évaporation, tandis qu'à pleine couverture végétale, plus de 90 % de l'ET provient de la transpiration.

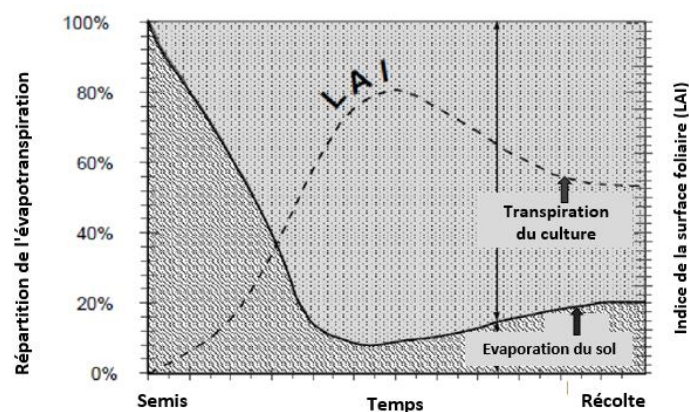


Figure III.1 La répartition de l'évapotranspiration entre évaporation et transpiration au cours de la période de croissance d'une grande culture annuelle [62]

Le taux d'ET d'une culture de référence hypothétique (surface de référence) avec une hauteur de culture supposée de 0,12 m, une résistance de surface fixe de 70 sm⁻¹ et un albédo de (0,23) est appelée évapotranspiration de référence (ET₀) [63]. La surface de référence ressemble de près à une vaste surface d'herbe verte, de hauteur uniforme, en croissance active, ombrageant complètement le sol et adéquatement arrosée. L'exigence selon laquelle la surface de l'herbe doit être à la fois étendue et uniforme résulte de l'hypothèse selon laquelle tous les flux sont unidimensionnels vers le haut [64].

L'ET₀ peut être déterminé expérimentalement à l'aide d'évapotranspiromètres à balance ou de lysimètres de drainage. Ces procédures sont toutefois difficiles et coûteuses, de sorte que l'estimation indirecte de l'ET₀ sur la base de formules empiriques est encore largement utilisée [65]. En 1990, à Rome, la FAO, en collaboration avec l'Organisation météorologique mondiale, a organisé une réunion d'experts pour évaluer différentes méthodes de calcul de l'ET₀. La recommandation issue de cette réunion était l'équation FAO-Penman-Monteith pour l'évapotranspiration de référence [63].

La méthode FAO Penman-Monteith est une procédure basée sur les données climatiques du site choisi pour le système d'irrigation. Les données climatiques sont le rayonnement solaire, la température, l'humidité, la pression de vapeur et la vitesse du vent.

La méthode FAO Penman-Monteith pour estimer l'ET₀ est traduit par l'équation suivante :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{III.1})$$

Avec

ET ₀	Évapotranspiration de référence [mm/jour],
R _n	Rayonnement net à la surface de la culture [MJ/m ² jour],
G	Densité du flux thermique du sol [MJ/m ² jour],
T	Température moyenne quotidienne de l'air à 2 m de hauteur [°C],
u ₂	Vitesse du vent à 2 m de hauteur [m/s],
e _s	Pression de vapeur saturante [kPa],
e _a	Pression de vapeur réelle [kPa],

$e_s - e_a$	Déficit de pression de vapeur saturante [kPa],
Δ	Pente de la courbe de pression de vapeur [kPa/°C],
γ	Constante psychrométrique [kPa/°C].

III.2.2. Besoins en eau des cultures

La quantité d'eau nécessaire pour compenser la perte par évapotranspiration du champ cultivé est définie comme le besoin en eau de la culture. Cette évapotranspiration doit être entièrement satisfaite par l'irrigation et/ou les précipitations pour que la production potentielle de la culture ne soit pas affectée. L'évapotranspiration est la variable la plus importante à prendre en compte pour planifier une stratégie d'irrigation pour une culture donnée dans un régime climatique donné [62].

Le calcul de (ET) est la première étape pour établir les besoins en eau des cultures. La méthode la plus utilisée est celle recommandée par la FAO [62], dans laquelle l'évapotranspiration de la culture (mm/jour) dans les conditions standards (absence de tout stress environnemental) est calculée comme le produit de deux facteurs :

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (III.2)$$

Où ET_c est l'évapotranspiration de la culture (mm/jour), ET_0 est l'évapotranspiration de référence (mm/jour) qui dépend essentiellement du climat du site et K_c est le coefficient cultural caractérisant le type de culture traité. C'est le rapport entre l' ET_c de la culture et l' ET_0 , et il représente une intégration des effets de quatre qualités essentielles qui différencient la culture de l'herbe de référence, et il couvre l'albédo (réflectance) de la surface du sol de la culture, la hauteur de la culture, la résistance de la canopée, et l'évaporation du sol [66]. En raison des différences d'ET au cours des stades de croissance, le K_c de la culture varie au cours de la période de développement qui peut être divisée en quatre stades distincts : initial, développement de la culture, mi-saison et fin de saison [62].

Dans le cas de conditions non-standards (avec stress environnemental), l' ET_c est ajustée (ET_r) avec l'ajout du coefficient K_s traduisant le stress hydrique de la culture Figure III.2.

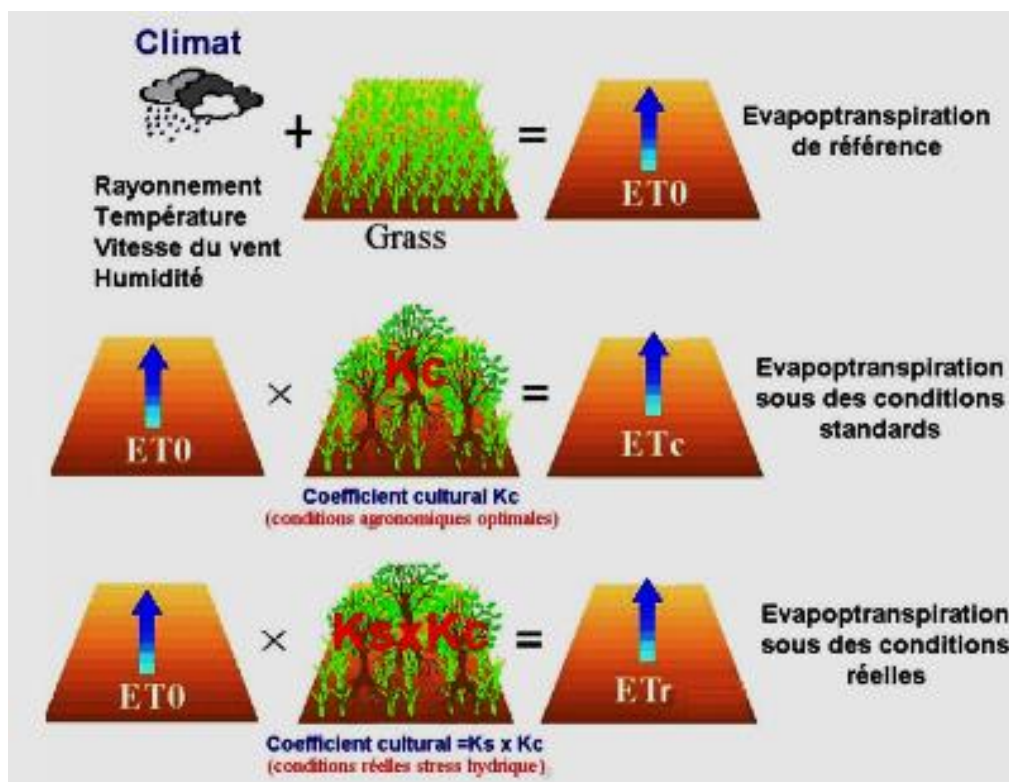


Figure III.2 Evapotranspiration de référence (ETo), de la culture dans des conditions standard (ETc) et de la culture dans des conditions non standard (ETr) [64]

Les méthodes manuelles pour calculer l'ETo à l'aide de l'équation de Penman-Monteith de la FAO, ainsi que la détermination des besoins en eau et en irrigation des cultures sont à la fois complexes et fastidieuses. Étant donné que les ingénieurs et les praticiens de l'irrigation doivent souvent évaluer les besoins en eau des cultures pour plusieurs projets simultanément, l'ensemble du processus devient excessivement long lorsqu'il est effectué manuellement. Il est donc essentiel d'automatiser ce processus par le biais de l'informatique afin d'accélérer les calculs et d'alléger la nature fastidieuse du travail. L'utilisation de techniques informatiques permet d'intégrer l'évapotranspiration des cultures, les précipitations, l'irrigation et le drainage dans un modèle complet de bilan hydrique [64].

CROPWAT, développé par la FAO, est un programme informatique conçu à cet effet. CROPWAT pour Windows est un programme informatique qui permet de calculer les besoins en eau et en irrigation des cultures à partir des données relatives au sol, au climat et aux cultures. En outre, le programme permet d'élaborer des programmes d'irrigation pour différentes conditions de gestion et de calculer l'approvisionnement en eau pour différents types de cultures. CROPWAT 8.0 peut également être utilisé pour évaluer les pratiques d'irrigation des

agriculteurs et pour estimer les performances des cultures dans des conditions pluviales et irriguées.

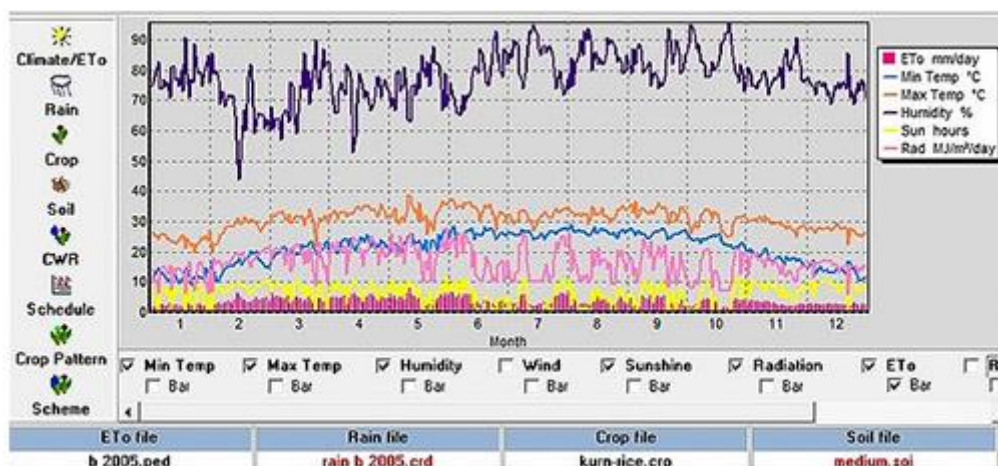


Figure III.3 L'interface du programme CROPWAT 8.0 [67]

Pour utiliser le logiciel CROPWAT 8.0, quatre types de données sont nécessaires :

Les données climatiques

Le CLIMWAT 2.0 pour CROPWAT est une publication conjointe du Service de développement et de gestion de l'eau et du Service de l'environnement et des ressources naturelles de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), qui propose des données agro climatiques observées dans plus de 5 000 stations à travers le monde [66].

CLIMWAT contient sept paramètres climatiques mensuels à long terme avec les coordonnées et l'altitude du lieu. Ces paramètres sont :

- ✚ Les températures mensuelles maximale et minimale (°C) ;
- ✚ La vitesse du vent (km/j) ;
- ✚ L'humidité relative moyenne (%) ;
- ✚ Les heures d'ensoleillement (h) ;
- ✚ Les précipitations (mm) et les précipitations effectives (mm).

Les données requises pour les cultures

- ✚ La profondeur d'enracinement ;
- ✚ Le coefficient de culture ;
- ✚ L'épuisement critique ;

- ✚ Le facteur de réponse au rendement ;
- ✚ La longueur des stades de croissance de la plante.

Les paramètres du sol requis sont :

- ✚ La teneur totale en eau disponible ;
- ✚ L'épuisement initial de l'eau ;
- ✚ Le taux maximal d'infiltration de la pluie ;
- ✚ La profondeur maximale.

Comme le montre la Figure III.4, le modèle nécessite un ensemble de données relatives aux conditions météorologiques, aux cultures et aux champs afin de produire plusieurs résultats qui aident à mieux gérer le processus agricole.

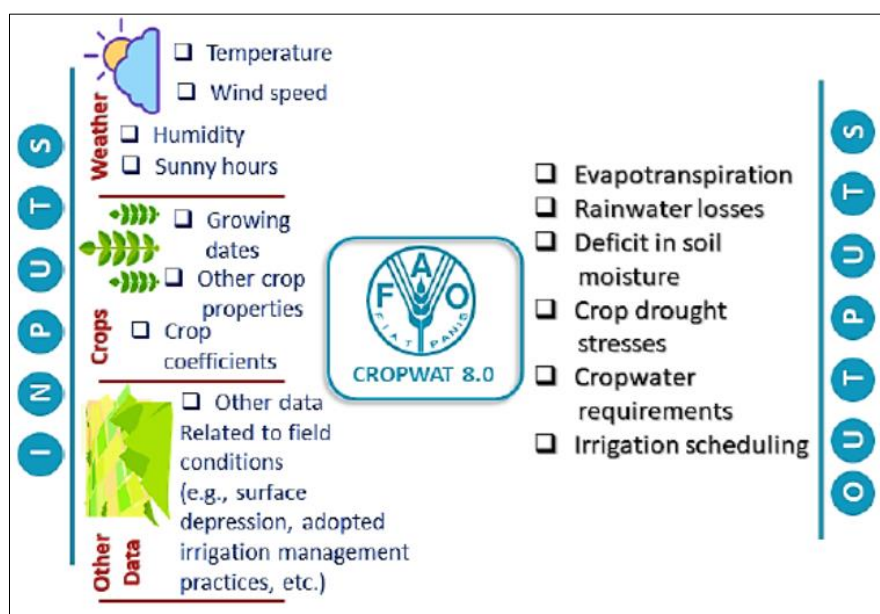


Figure III.4 Principales entrées et sorties du modèle CROPWAT 8.0

Toutes les procédures de calcul utilisées dans CROPWAT 8.0 sont basées sur les deux publications de la FAO de la série Irrigation et Drainage, à savoir le n° 56 "Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements" et le n° 33 intitulé "Yield response to water" [68]. CROPWAT utilise les données saisies pour effectuer des calculs, en tenant compte des stades de croissance des cultures, des taux d'évapotranspiration et de la capacité de rétention d'eau du sol. Le programme utilise des algorithmes et des équations spécialisés pour estimer avec précision les besoins en eau des cultures.

III.3. Dimensionnement du système de pompage solaire PV (SPSPV)

III.3.1. Hauteur manométrique totale et exigences énergétiques

La hauteur manométrique totale (H_{mt}) d'une pompe représente la résistance totale subie par l'eau lors de son trajet de la source d'eau au point de livraison et se traduit par la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. La pompe doit avoir la capacité de fonctionnement nécessaire pour surmonter la hauteur manométrique totale afin de pouvoir déplacer l'eau vers la destination requise. La H_{mt} comprend la hauteur à laquelle l'eau doit être soulevée (hauteur statique) ainsi que la friction de l'eau circulant dans les tuyaux (hauteur dynamique).

La hauteur manométrique totale (H_{mt}) à tout moment du fonctionnement de la pompe peut être représentée comme suit [69] :

$$H_{mt} = H_s + H_R + H_D + H_d \quad (\text{III-3})$$

Où H_s est la hauteur statique et est égale à la différence entre le niveau statique de l'eau et le point de décharge ; H_R est le niveau d'eau de rabattement, c'est-à-dire la différence entre le niveau statique et le niveau dynamique de l'eau ; H_D et H_d sont respectivement les hauteurs de charge équivalentes dues aux pertes par frottement dans les composants de la canalisation et du raccord (pertes singulières dans des composants spécifique).

En revanche, les pertes par frottement dans la tuyauterie (H_D) constituent une hauteur dynamique où la formule de Darcy-Weis Bach permet leur calcul [70] :

$$H_D = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.4})$$

Où (L) est la longueur de la canalisation, D est le diamètre interne de la canalisation, λ est le coefficient de friction de la canalisation en fonction du nombre de Reynold (0,2461 pour un écoulement turbulent modéré), g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2), et v est la vitesse moyenne de l'eau (m/s), qui est liée au débit d'eau et à la surface de la section transversale de la canalisation, comme décrit ci-dessous :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{III.5})$$

Où Q est le débit horaire de l'eau (m^3/h).

Les pertes par frottement, qui sont causées par la présence d'autre type d'accessoires, tels que les vannes, les jonctions, les coudes, les tés et l'entrée des tuyaux, peuvent être calculées pour chaque élément avec la formule suivante [71] :

$$H_d = \beta \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.6})$$

Où β est un coefficient qui est lié au type de composant.

En considérant les formules III-4, III.5 et III.6, la hauteur manométrique totale peut être évaluée par :

$$H_{mt} = H_s + H_R + \frac{v^2}{2g} \times \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum \beta \right) \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas de forages qui présentent des variations importantes du niveau d'eau en fonction du débit, où la constance du niveau d'eau nécessite des taux de pompage bien inférieurs à la capacité maximale du forage, la hauteur manométrique totale (H_{mt}) de forage, peut être exprimée par l'équation approximative suivante [72] :

$$H_{mt} = H_{0T} + H_{ST} + \frac{H_{DT} + H_{ST}}{Q_{max}} Q_{AP} + H_F(Q_{AP}) \quad (\text{III.8})$$

Avec

$$Q_{AP} = \alpha Q_d \quad (\text{III.9})$$

Où H_F la perte de charge par frottement (pertes locales et linéaires) (m) correspondant à Q_{AP} , (H_{0T}) la hauteur verticale de la sortie d'eau au sol (m), (H_{ST}) le niveau statique (niveau de la nappe) (m), (H_{DT}) le niveau dynamique de l'eau dans le forage (m), Q_{max} la capacité maximale de débit du forage (m^3/h), Q_{AP} le débit moyen, dit "débit apparent" (m^3/h), Q_d la quantité moyenne journalière d'eau pompée ($m^3/jour$), α coefficient de calcul du débit moyen.

En dehors de ce qui précède, il est important de souligner la nécessité d'une compatibilité entre la capacité de décharge du forage et l'eau pompée, c'est-à-dire... que la puissance du système de pompage PV doit être synchronisée dans ce sens. Pour cette raison, il est nécessaire d'introduire la contrainte de l'eau pompée quotidiennement du forage dans une période donnée, par l'équation suivante [73] :

$$Q_d \leq Q_{max} t_r \quad (\text{III.10})$$

Où t_r est l'insolation quotidienne moyenne réelle (h).

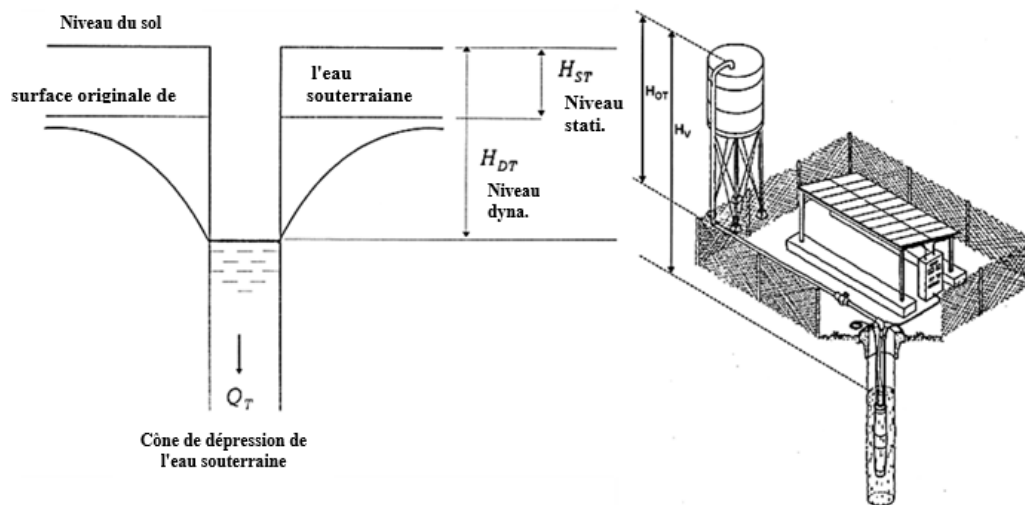


Figure III.5. Les variations du niveau de l'eau : profils de diffusion autour du trou de forage

[72]

III.3.2. Considérations de conception pour les systèmes de pompage solaire

Une solution d'irrigation solaire correctement spécifiée et installée peut offrir un service de longue durée et sans problème, ainsi qu'un excellent retour sur investissement. Lors de l'évaluation de la faisabilité, de la taille et de la configuration, les facteurs clés comprennent le calendrier de pompage, le volume et la fiabilité de l'approvisionnement en eau requis, la capacité de stockage de l'eau et la possibilité d'intégrer l'énergie solaire à d'autres sources d'énergie.

Evaluation du site :

Une évaluation précise du site est essentielle à la réussite de la conception d'une pompe solaire. Évaluer les facteurs tels que l'irradiation solaire, l'ombrage, les conditions climatiques et l'espace disponible. Cela permet de s'assurer que la conception du système et les emplacements d'installation sont spécifiques au site, de sorte que le système fournisse les débits de pompage requis, avec le moins d'énergie perdue possible. L'évaluation du site consiste à recueillir des informations précises sur les besoins quotidiens en eau, sur les ressources solaires historiques du site, sur les sources d'eau possibles et sur le point de livraison de l'eau.

Ressources solaires :

Comme l'irradiance varie avec l'heure de la journée, la puissance disponible pour la pompe, le débit conséquent et la hauteur de charge totale imposée à la pompe PV varient

également avec l'heure. Analyser précisément la relation entre l'irradiation et le débit, et déterminer de manière générale le volume d'eau pompé pendant une certaine période de temps sont des tâches assez complexes [72].

Des données sur le rayonnement solaire mois par mois sont nécessaires pour évaluer correctement l'adéquation d'un emplacement pour les pompes solaires. Il n'est pas suffisant de dimensionner une pompe solaire sur la base de la disponibilité annuelle de l'énergie solaire, car une pompe dimensionnée de cette manière peut ne pas fournir suffisamment d'eau pendant les mois de faible ensoleillement. Pour des raisons de commodité, le rayonnement solaire mensuel est généralement exprimé en termes d'irradiation moyenne quotidienne pour le mois, soit MJ/m² par jour. Les données de rayonnement disponibles sont généralement sous forme d'irradiation globale et constituent le point de départ de l'évaluation du site. Si possible, les données doivent être obtenues à partir de la station météorologique la plus proche, en tenant compte de tout microclimat local connu [74].

Les ressources solaires disponibles sur un site déterminent la production d'énergie d'un système photovoltaïque installé sur ce site et la durée de fonctionnement d'une pompe à eau solaire au cours d'une journée normale. Les données appropriées doivent être utilisées pour déterminer la quantité d'insolation (heures d'ensoleillement maximum) disponible sur le site. Pour évaluer la ressource solaire d'un site, vous pouvez utiliser les données historiques de rayonnement solaire, généralement exprimées en niveaux de rayonnement solaire reçus par une surface horizontale.

Une étude sur place est recommandée pour les sites où les données relatives à l'ensoleillement sont insuffisantes ou douteuses. L'étude doit être menée par un spécialiste qualifié et inclure des données permettant de vérifier l'insolation réelle du site. L'établissement des niveaux de rayonnement solaire quotidien moyen pour chaque mois fournira suffisamment d'informations pour permettre une évaluation éclairée du système de pompage solaire PV proposé. Les niveaux de rayonnement solaire quotidien moyen sur le site peuvent être mesurés en heures d'ensoleillement maximum (PSH) ou en kWh/m². Ces unités de mesure sont équivalentes et donnent donc les mêmes valeurs.

Ressource en eau :

Les ressources en eau disponibles sur un site doivent être évaluées afin de sélectionner une source appropriée pour le système de pompage solaire. Dans de nombreux cas, la source d'eau aura déjà été choisie. Le système de pompage solaire doit être conçu en tenant compte des limites de la source d'eau proposée. De nombreux types de sources d'eau peuvent être envisagés. Les plus courantes sont les barrages, les forages ou les aquifères, les rivières ou les ruisseaux. Chaque source possède des caractéristiques qui doivent être prises en compte lors de la planification d'un système de pompage. Par exemple, l'eau de forage peut être située en profondeur et si c'est le cas, elle aura une hauteur de charge plus importante et un débit de pompage plus faible. En revanche, la disponibilité de l'eau de forage est plus stable, car elle est moins affectée par les changements saisonniers.

Si la source d'eau est un puits, les éléments suivants devront être déterminés :

- Le niveau statique de l'eau
- Le taux de pompage et le rabattement associé (ainsi que toute variation saisonnière)
- La qualité de l'eau

La valeur de rabattement obtenue à partir de la diagraphie doit être utilisée pour déterminer le potentiel de production du puits afin de s'assurer qu'il sera en mesure de répondre aux besoins en eau estimés de l'opération. Si la diagraphie indique un rabattement excessif pendant la durée de l'essai, il se peut que le puits n'ait pas la capacité de répondre aux besoins en eau du projet. Si la capacité du puits est remise en question, il convient de procéder à un essai complet du puits et de mesurer les niveaux de rabattement pour différents débits.

Point de livraison de l'eau :

L'eau d'un système de pompage solaire photovoltaïque (SPSPV) peut être acheminée directement vers l'application (par exemple, irrigation au goutte-à-goutte ou par aspersion) ou vers une forme de stockage de l'eau, telle qu'un barrage ou un réservoir d'eau. L'emplacement de ce point de livraison de l'eau déterminera la hauteur de charge nécessaire à la pompe. Plus le point de distribution est élevé ou éloigné de la source, plus la puissance de pompage nécessaire pour acheminer l'eau de la source au point de distribution est importante.

Un réservoir de stockage de l'eau est normalement un élément essentiel d'un système de pompe à eau solaire économiquement viable. Un réservoir peut être utilisé pour stocker suffisamment d'eau pendant les pics de production d'énergie pour répondre aux besoins en eau

en cas de temps nuageux ou de problèmes de maintenance du système d'alimentation. Idéalement, le réservoir devrait être dimensionné pour stocker au moins trois jours d'eau. Plusieurs réservoirs peuvent être nécessaires si un très grand volume d'eau doit être stocké.

III.3.3. Composants du (SPSPV)

Avec la prise de conscience croissante de l'émergence d'une crise énergétique dans le monde, les systèmes de pompage d'eau alimentés par l'énergie solaire ont été un véritable centre d'intérêt pour les chercheurs depuis des décennies. Il existe plusieurs conceptions possibles pour développer le système de pompage solaire. Toutefois, la plus courante est celle qui fait intervenir des panneaux photovoltaïques [75].

Leurs principaux avantages par rapport aux pompes manuelles ou aux pompes à moteur à combustion interne sont leur entretien pratiquement nul, leur longue durée de vie, le fait qu'elles n'ont pas besoin de carburant, qu'elles ne contaminent pas, et enfin qu'elles sont simples à installer. Une autre caractéristique importante est que, comme ils utilisent le soleil comme source d'énergie, les périodes de demande maximale d'eau coïncident avec les périodes de rayonnement solaire maximal. Leurs inconvénients sont leur coût d'investissement initial élevé, et la variabilité du rendement des panneaux solaires en fonction des conditions météorologiques, bien que ce dernier problème puisse être au moins partiellement résolu en stockant l'eau dans une citerne à une certaine hauteur.

Le système de pompage d'eau solaire photovoltaïque (SPSPV) est une combinaison d'un panneau photovoltaïque et d'une pompe, dans laquelle la pompe fonctionne grâce à l'électricité générée par le panneau photovoltaïque. Le composant de base est la cellule photovoltaïque qui convertit directement l'énergie solaire en énergie électrique, et cette énergie entraîne le moteur par le biais d'un contrôleur qui assure le bon fonctionnement de la pompe. Des composants de stockage peuvent également être utilisés dans ce système, comme la batterie pour le stockage de la charge électrique et le réservoir pour le stockage de l'eau. La hauteur de charge et le débit requis pour la pompe varient en fonction des applications. En fonction de la hauteur de charge et du débit requis, on utilise la pompe et le panneau photovoltaïque appropriés. Le schéma structurel du (SPSPV) est illustré à la Figure III.6. Elle comporte trois composants principaux [76]: Le système photovoltaïque, le système de contrôle de la puissance et le système dynamique contenant le moteur et la pompe.

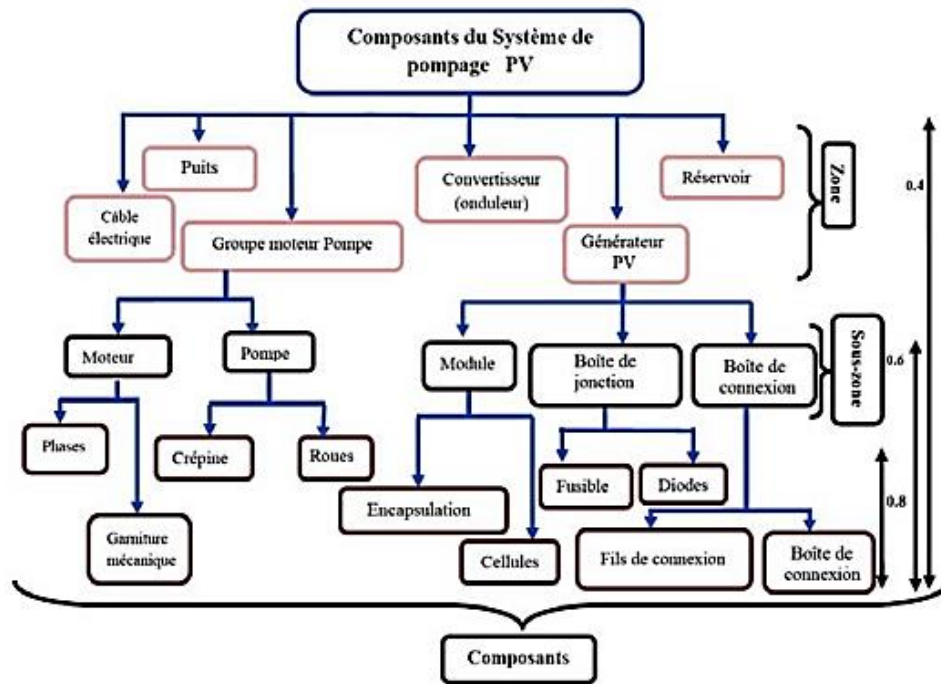


Figure III.6. Schéma structurel du (SPSPV) [77]

Le Champ photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est une section complète de production d'énergie qui se compose d'un nombre quelconque de modules et de panneaux photovoltaïques. Les panneaux photovoltaïques sont constitués d'un ou plusieurs modules photovoltaïques connectés ensemble en tant qu'unité précâblée, tandis qu'un module photovoltaïque est un arrangement combiné d'un certain nombre de cellules solaires qui sont connectées en parallèle ou en série pour produire des niveaux de puissance plus élevés. La connexion en série ou en parallèle entre les panneaux solaires dépend en fait de la tension souhaitée pour la pompe. La conception du réseau photovoltaïque dépend de l'alimentation électrique souhaitée pour la pompe et des pertes d'énergie. Il peut être conçu de manière à fournir la puissance nécessaire à la pompe à chaque heure de la journée. Si le régulateur et les batteries sont également utilisés, la taille du réseau PV sera plus importante. De plus, l'ajout d'un onduleur pour faire fonctionner un moteur à courant alternatif augmenterait également la demande d'énergie. Un système de suivi peut également être utilisé en liaison avec le générateur photovoltaïque pour optimiser les performances du système.

Le Système de contrôle de la puissance :

Le système de contrôle de l'énergie se compose d'un contrôleur de charge, d'une unité de stockage d'énergie, d'un onduleur, etc. Le contrôleur de charge est utilisé pour charger les batteries à partir des panneaux solaires. Il empêche la batterie d'être surchargée et arrête le processus de charge lorsque la batterie est complètement chargée et gère la décharge pour protéger la batterie. Dans les systèmes de panneaux photovoltaïques à grande échelle, des contrôleurs de charge avancés sont utilisés. Ils fournissent des statistiques complètes sur les volts et les ampères pendant la charge de la batterie. Ils déconnectent automatiquement la batterie lorsqu'elle est sur le point d'être vide. Pour les systèmes (SPSPV), des contrôleurs de charge connus sous le nom de contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) peuvent également être utilisés. Les contrôleurs MPPT suivent la puissance maximale possible du réseau de panneaux photovoltaïques. L'onduleur convertit le courant continu du système photovoltaïque en courant alternatif, ce qui permet d'utiliser des instruments fonctionnant en courant alternatif. En outre, quelques interconnexions simples sont également utilisées comme des commutateurs, des câbles, des connecteurs, etc.

Le Système dynamique :

Le système dynamique du (SPSPV) se compose d'un moteur et d'une pompe. Il est utilisé pour créer un flux en pompant de l'eau. Le moteur reçoit l'énergie électrique du système PV et la transforme en énergie cinétique, tandis que la pompe convertit cette énergie cinétique en énergie hydraulique de l'eau. Le moteur reçoit l'énergie électrique par l'intermédiaire d'un onduleur et la transforme en énergie mécanique à l'aide d'aimants permanents et d'électro-aimants impliquant des phénomènes d'attraction et de répulsion.

Différents types de pompes sont disponibles sur le marché, avec des capacités différentes en fonction de la quantité d'eau requise. Dans les SPSPV, trois types de pompes sont principalement utilisés : les pompes submersibles, les pompes centrifuges et les pompes volumétriques. Une pompe solaire est sélectionnée en fonction du débit requis, de la hauteur de charge et d'autres conditions. Les pompes submersibles offrent un débit et une hauteur de refoulement élevés. Il n'y a pas de problème de cavitation mais elles ont une durée de vie plus courte parce qu'elles sont situées à l'intérieur de l'étang et pompent vers le haut de l'étang. Leur entretien est également difficile, ce qui entraîne la corrosion et la détérioration des joints d'étanchéité. Les pompes centrifuges fonctionnent à faible hauteur de charge et à haut débit. Leur puissance d'aspiration est relativement faible. L'amorçage est souvent nécessaire et la

cavitation est fréquente. Les pompes volumétriques sont utilisées lorsque la hauteur dynamique total est élevée, car leur puissance d'aspiration est relativement bonne, mais leur débit est faible. En fonction de la hauteur de charge et du débit requis, une pompe appropriée est utilisée pour un site spécifique. Les pompes solaires sont connectées directement ou indirectement au réseau photovoltaïque.

III.3.4. Conception du SPSPV

La Figure III.7 montre un diagramme schématique d'un système de pompage PV généralisé.

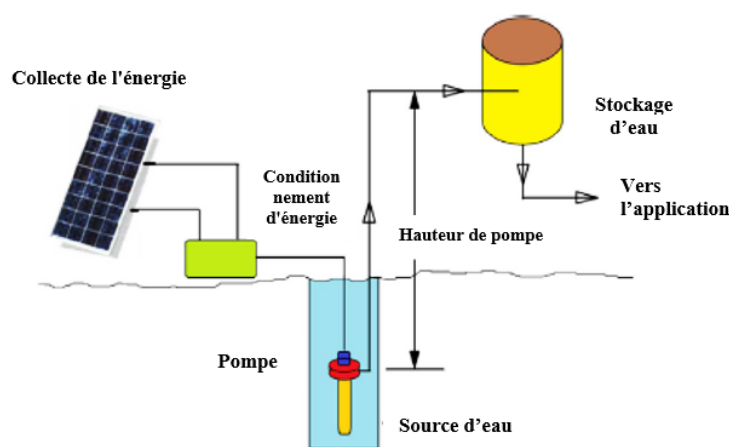


Figure III.7 Schéma d'un système généralisé de pompage de l'eau par énergie solaire PV [55]

Le champ solaire fournit l'énergie nécessaire au système de pompage de l'eau. Les niveaux de rayonnement solaire fluctuent au cours de la journée et il n'y en a pas la nuit, de sorte qu'un système de pompage solaire doit être conçu pour pomper les besoins quotidiens en eau en tenant compte de ces limites énergétiques. La taille du système de pompage solaire est déterminée par la quantité d'eau à déplacer et par la distance à parcourir. La taille du système de pompage solaire est déterminée par la quantité d'eau qui doit être déplacée et par la distance et l'altitude à laquelle cette eau doit être déplacée.

La conception d'une station de pompage photovoltaïque (PV) implique plusieurs étapes pour assurer un fonctionnement efficace et fiable du système (optimiser l'efficacité et le coût). Les étapes du processus de conception sont illustrées à la Figure III.8.

Au cours de la phase de conception, les concepteurs du système doivent décider si le système doit être connecté au réseau ou hors réseau, avec ou sans stockage, et si le stockage se fait dans des batteries ou dans des réservoirs d'eau. Ils doivent décider du type de pompe utilisé

et si l'application nécessite une pompe submersible ou une pompe de surface, utilisant du courant alternatif ou continu. Tous ces facteurs ont une incidence sur les performances du système et la faisabilité de la solution proposée.

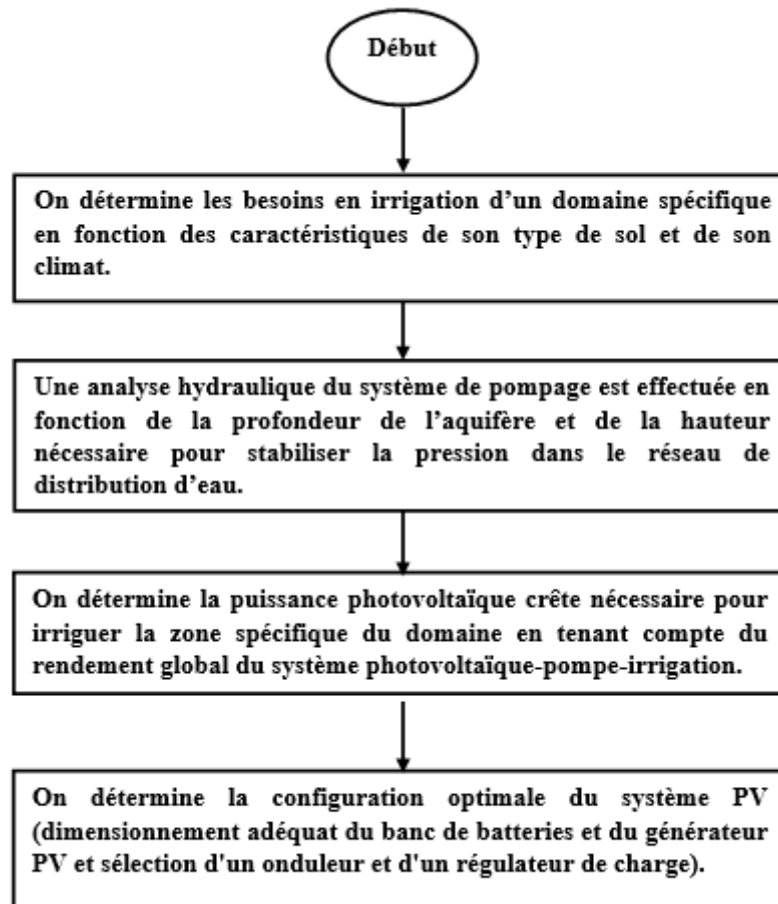


Figure III.8 Les étapes de la conception d'un système de pompage solaire PV [58]

Estimation des besoins en eau d'irrigation :

Le besoin en irrigation est l'un des principaux paramètres pour la planification, la conception et le fonctionnement des systèmes d'irrigation et des ressources en eau. Il est important de faire la distinction entre les besoins en eau des cultures et les besoins en irrigation (IR). Alors que les besoins en eau des cultures correspondent à l'eau utilisée par les cultures pour la construction des cellules et la transpiration, les besoins en irrigation correspondent à l'eau qui doit être fournie par le système d'irrigation pour que la culture reçoive la totalité de ses besoins en eau. Si l'irrigation est la seule source d'approvisionnement en eau de la plante, les besoins en irrigation seront toujours supérieurs aux besoins en eau de la culture pour tenir compte des inefficacités du système d'irrigation [64].

La capacité d'un système de pompage solaire photovoltaïque à répondre à ces besoins quotidiens en eau, en fonction de paramètres spécifiques au site, déterminera le succès de la conception du système. Ces besoins influenceront :

- ✚ Le choix de la source d'eau,
- ✚ Le point de livraison de l'eau pompée,
- ✚ La nécessité ou non de stocker l'eau,
- ✚ Les types de pompes à eau qui conviendront à l'application,
- ✚ La taille requise de la pompe, et
- ✚ La conception de l'installation solaire.

Dans le processus d'irrigation, la demande en eau ajoutée change généralement de temps en temps, en fonction des pluies et de la demande en eau réelle de la culture. La quantité d'eau nécessaire pour irriguer une surface donnée dépend d'un certain nombre de facteurs, dont les plus importants sont les suivants [78] :

- ✚ La nature de la culture et le cycle de croissance de la culture,
- ✚ Les conditions climatiques,
- ✚ Le type et l'état du sol,
- ✚ L'efficacité des applications sur le terrain,
- ✚ La qualité de l'eau,
- ✚ La topographie du terrain.

Beaucoup d'entre elles varient selon les saisons, et la quantité d'eau nécessaire est loin d'être constante. La conception d'une installation de pompe d'irrigation devra tenir compte de tous ces facteurs. Une estimation de la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation peut généralement être obtenue auprès d'experts et d'agronomes locaux. Il comporte plusieurs étapes de calcul [74]:

- ✚ Les méthodes de prédiction sont utilisées pour estimer les besoins en eau des cultures, en raison de la difficulté d'obtenir des mesures précises sur le terrain.
- ✚ Les contributions effectives des précipitations et des eaux souterraines à la culture sont soustraites des besoins en eau de la culture pour donner les besoins nets en irrigation.
- ✚ L'application sur le terrain et l'efficacité du transport de l'eau sont prises en compte pour donner les besoins bruts en eau pompée.

Les besoins en eau d'irrigation peuvent être évalués à partir de l'évapotranspiration de référence (ET_o), en calculant l'évapotranspiration en conditions culturales (ET_c), la précipitation effective et en tenant compte de l'efficacité du système d'irrigation [79]. Dans le cas d'une irrigation complète (non déficitaire) où la culture sera arrosée pour satisfaire la totalité de ses besoins en irrigation, alors le volume d'irrigation quotidien V_{irr} ($m^3/jour$) est calculé par [80] :

$$V_{irr} = (ET_c - P_{iff}) * EI * A_{irr} * 10 \quad (III.11)$$

Où A_{irr} est la superficie irriguée (ha), P_{iff} est les précipitations efficaces fiables (mm), la valeur de 10 est le facteur de conversion unitaire et EI est l'efficacité de l'irrigation.

Estimation du débit requis de la pompe :

Le débit est la quantité d'eau qui peut être pompée dans un certain intervalle de temps, par exemple par jour ou par heure. Dans le cas d'un système de pompage alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque, il peut être nécessaire d'ajuster les débits journalier et horaire requis pour tenir compte des variations des niveaux de rayonnement solaire observés sur le site au cours de la journée et de l'année.

Le débit de conception de la pompe est calculé en divisant les besoins quotidiens en eau de l'opération par le nombre d'heures d'ensoleillement maximal par jour (PSH). Pour calculer le débit par heure, l'équation suivante peut être utilisée :

$$Débit \left(\frac{m^3}{\text{heur}} \right) = \frac{\text{débit journalier requis} \left(\frac{m^3}{\text{jour}} \right)}{\text{moyenne journalière de la PSH} \left(\frac{\text{heur}}{\text{jour}} \right)} \quad (III.12)$$

Hauteur manométrique totale (H_{mt}) pour la pompe :

Hauteur manométrique totale (H_{mt}) englobe divers facteurs tels que la hauteur statique (distance verticale entre la source et la destination), les pertes de charge et la vitesse. La (H_{mt}) est essentiel pour déterminer les performances et l'efficacité des pompes, car il représente les forces combinées nécessaires pour surmonter les obstacles et atteindre le débit et la pression souhaités dans le système.

Le H_{mt} est égal à la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$H_{mt} = \text{hauteur statique} + \text{hauteur dynamique}$$

Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

Le point de départ de toute évaluation du pompage de l'eau est la relation entre les besoins en énergie et en eau. Une fois définies les besoins en irrigation nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, l'énergie hydraulique journalière E_h requise peut être estimée à partir de la demande d'eau journalière (V_{irr}) et de la hauteur manométrique totale (H_{mt}) avec la formule suivante :

$$E_h = C_h * V_{irr} * H_{mt} \quad (III.13)$$

Dans laquelle E_h est exprimée en Wh/jour, C_h est la constante hydraulique, qui est donnée par :

$$C_h = \frac{\rho g}{3600} \quad (III.14)$$

Où ρ est la densité de l'eau (1000 kg m^{-3}), g est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) et 3600 est le nombre de secondes par heure.

Après substitution, l'énergie hydraulique journalière à la sortie d'un système de pompage E_h , qui exprimée en kWh/jour est donnée par :

$$E_h = \frac{2.72 * V_{irr} * H_{mt}}{1000} \quad (III.15)$$

Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

La phase la plus délicate concerne le dimensionnement et l'optimisation du système PV de pompage qui est une tâche très complexe en raison de la variabilité des paramètres d'entrée. Plusieurs ouvrages sur le dimensionnement des systèmes PV ont été publiés. Ces travaux sont basés sur la simulation du fonctionnement de chaque composant du système PV [81].

L'équation de la puissance électrique nominale du générateur PV P_{el} exprimée en (W), dans les conditions de référence (conditions d'essai standard STC - intensité du rayonnement solaire 1000 W/m^2 , masse d'air relative AM1,5 et température du générateur PV $25 \text{ }^\circ\text{C}$), selon [74] est la suivante :

$$P_{el} = \frac{G_0}{f_m [1 - \alpha_c (T_{cell} - T_r)] \eta_{MP}} * \frac{E_h}{G_T} \quad (III.16)$$

où E_h (kW h/jour) est l'énergie hydraulique de sortie, G_0 (1000 W/m^2) éclairement dans les conditions de référence (STC), G_T ($\text{kWh/m}^2\text{/jour}$) l'irradiation globale sur le plan du

générateur PV, α_c le coefficient de température de la cellule PV ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) qui prend des valeurs entre 0,004 et 0.005 / $^{\circ}\text{C}$ pour des modules au silicium mono et polycristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe, T_r la température référentielle de la cellule (25 $^{\circ}\text{C}$), η_{MP} l'efficacité de l'unité moteur-pompe, et T_{cell} température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement ($^{\circ}\text{C}$) qui peut être calculée par l'équation :

$$T_{cell} = T_a + \frac{NOCT-20}{800} G_s \quad (\text{III.17})$$

Où T_a est la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$), G_s l'intensité du rayonnement solaire (W/m^2) et NOCT la température nominale de fonctionnement de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).

f_m est le facteur d'adaptation de la charge aux caractéristiques du générateur PV (le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et celle qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum).

Par conséquent, le calcul de la puissance électrique nominale du générateur PV (P_{el}) sur la base de la demande journalière moyenne mensuelle connue d'énergie hydraulique (E_h) et du rayonnement solaire journalier moyen mensuel (G_T) disponible au cours du mois critique, ainsi que du rendement connu de l'unité moteur-pompe (η_{MP}) dans des conditions de fonctionnement de référence, en tenant compte de l'effet de la température extérieure sur le rendement du générateur PV [73].

P_{el} (Eq. III 15) représente le mois critique, si le mois au cours duquel le rapport entre l'énergie solaire hydraulique et l'énergie solaire rayonnée (E_h / G_T) est maximal.

De plus, avec les systèmes de pompage PV modernes, qui sont pour la plupart contrôlés électroniquement, au lieu du facteur d'adaptation f_m , il est justifié d'utiliser l'efficacité de l'onduleur η_i , qui peut inclure l'efficacité de l'ensemble du système électronique pour adapter la puissance de la charge aux caractéristiques du générateur PV. En combinant cette efficacité avec l'efficacité de l'unité moteur-pompe (η_{MP}) en une seule efficacité (η_{MPI}), et en lui insérant dans l'Eq. (III-15), et ensuite en insérant l'Eq. (III-14) dans l'Eq. (III-15), on obtient la relation finale pour le calcul de la puissance électrique du système de pompage PV [73] :

$$P_{el} = \frac{2.72}{f_m [1 - \alpha_c (T_{cell} - T_r)] \eta_{MPI}} * \frac{V_{irr} * H_{mt}}{G_T} \quad (\text{III.18})$$

Où

$$\eta_{MPI} = \eta_{MP} * \eta_I \quad (\text{III.19})$$

D'après Eq. (III-17), il est possible de déterminer la taille nécessaire du champ photovoltaïque pour une hauteur de pompage et un besoin en eau donnés et d'estimer la quantité d'eau quotidienne produite par la taille du champ pour une irradiation donnée.

Dimensionnement du moteur :

Les moteurs électriques sont un élément important de l'équipement du sous-système de pompage photovoltaïque. Les moteurs électriques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique d'un arbre rotatif. Il existe deux principaux types de moteurs utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïques : les moteurs à induction et les moteurs à courant continu (CC). La classification de ces moteurs est illustrée à la figure III.9.

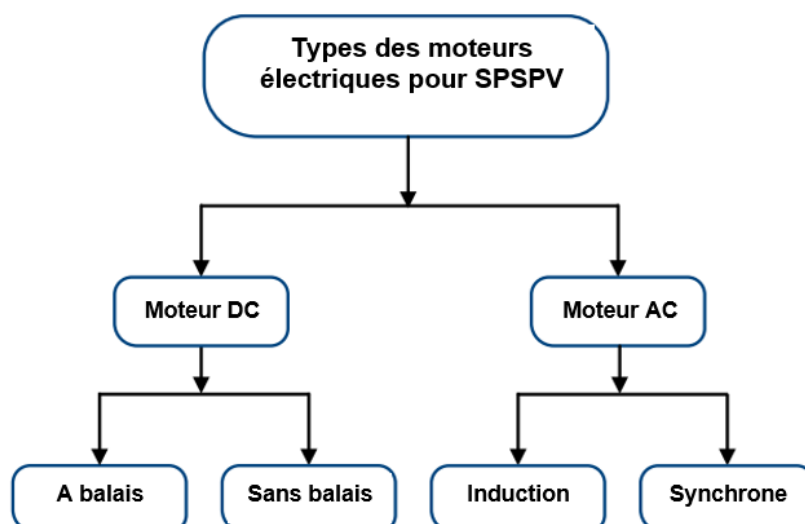


Figure III.9 Principaux types de moteurs électriques pour les applications de pompes PV [57]

Il n'est pas possible d'affirmer sans ambiguïté qu'un type particulier de moteur électrique est le meilleur pour un système de pompage photovoltaïque. Le processus de sélection d'un moteur électrique dépend des exigences spécifiques d'une application. Par exemple, dans le cas d'un forage, il n'est parfois même pas possible de choisir un moteur électrique séparément. Dans la plupart des cas, les pompes submersibles de forage sont des pompes centrifuges équipées d'un moteur à induction à cage d'écureuil, qui est généralement installé dans le même boîtier par le fabricant. Les moteurs à courant continu à aimant permanent et à balais sont préférables lorsque la station d'épuration est alimentée directement par un réseau photovoltaïque et ne nécessite pas d'étapes supplémentaires de conversion de l'énergie. Ces

types de machines électriques sont généralement utilisés pour des applications dont la puissance ne dépasse pas 5 kW environ [57].

Le moteur doit être capable de supporter la puissance de pointe du champ PV. Les moteurs électriques étant généralement évalués en fonction de leur puissance électrique d'entrée, la puissance maximale du moteur doit être au moins aussi élevée que la puissance du générateur PV.

Sélection de pompe et besoins en énergie associés :

Le débit journalier requis détermine la taille de la pompe nécessaire ainsi que la taille du générateur PV qui sera nécessaire pour alimenter la pompe. La puissance hydraulique maximale de la pompe solaire sera donnée par le produit de la puissance maximale du générateur et du rendement maximal du sous-système. On peut obtenir le débit de pointe requis de la pompe en utilisant l'équation reliant la puissance hydraulique au débit et à la hauteur manométrique totale. La puissance est le taux de fourniture d'énergie, donc la formule de la puissance hydraulique est obtenue à partir de la formule de l'énergie en remplaçant le volume par le débit (Q), en mètres cubes par seconde.

Le débit crête de la pompe Q (m³/s) est donné par la relation [70] :

$$Q = \frac{10^3 * P_h}{2.72 * H_{mt}} \quad (\text{III.20})$$

Où P_h est la puissance hydraulique crête nécessaire exprimée en (kW).

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

$$P_h = P_{el} * \eta_{MPI} \quad (\text{III.21})$$

Sélection des modules PV et disposition du champ :

Lors de la conception d'un système de pompage solaire, il est important de minimiser les distances horizontales et verticales entre toutes les parties du système. Les câbles électriques et les conduites d'eau subissent tous deux des pertes d'énergie. Le fait de limiter leur longueur au minimum réduira les pertes d'énergie dans le système et permettra d'obtenir le système de pompage solaire photovoltaïque le plus efficace possible en fonction de votre site et de vos besoins. Une fois que la puissance de crête requise pour la pompe sélectionnée est connue, cette valeur peut être utilisée pour sélectionner le panneau solaire ou le groupe de panneaux

nécessaires pour fournir cette puissance. Lorsque plusieurs panneaux sont nécessaires, ils doivent être câblés en série, en parallèle ou en combinaison série-parallèle pour répondre aux exigences de tension et d'ampérage de la pompe. La puissance de sortie des panneaux individuels peut être additionnée pour déterminer la puissance totale qu'ils produisent.

Afin de maximiser la production d'énergie du système solaire, les panneaux doivent être orientés vers le sud, sans ombrage important à proximité, afin de bénéficier d'une exposition totale au soleil. Cependant, un ombrage partiel (par exemple, l'ombre de grands arbres) au loin, tôt le matin ou en fin d'après-midi, peut être inévitable. Les effets de tout ombrage présent doivent être pris en compte lors de la détermination de la quantité d'énergie solaire disponible. Il faut également tenir compte des effets potentiels de la pente et de l'aspect de l'ombrage futur dû à la croissance continue des arbres. Le champ solaire doit être placé aussi près que possible de la pompe afin de minimiser la longueur du câble électrique (et donc toute perte d'énergie), ainsi que les coûts d'installation.

III.4. Conception du pivot solaire

Le pompage de l'eau à énergie solaire PV a été testé et appliqué pour l'irrigation de surface, qui repose sur le pompage et le stockage de l'eau dans un réservoir, et son application ultérieure par gravité en cas de besoin [82]–[84]. Cette technologie a également été couplée et démontrée avec succès avec des systèmes d'irrigation goutte à goutte à basse pression et avec le stockage de l'eau dans un réservoir [59] [73] [75]. Malheureusement, à ce jour, les études portant sur les applications de la technologie PV avec un système d'irrigation à pivot central sont presque négligeables par rapport à celles menées sur l'irrigation de surface et goutte à goutte, ainsi que celles menées pour améliorer le système de pompage PV en étudiant ses composants de base. Et tout cela malgré les études menées sur le système d'irrigation à pivot central au cours des cinquante dernières années comme l'un des systèmes d'irrigation les plus répandus au monde.

Étant donné que l'énergie n'est souvent pas nécessaire au moment de l'irrigation si l'eau est stockée dans un réservoir ou un bassin à une altitude supérieure à celle du champ où elle doit être appliquée, une approche simple peut être utilisée pour concevoir ce type de système PV dans lequel une estimation du potentiel de pompage de l'eau (basée sur le nombre moyen d'heures d'ensoleillement disponibles) est mise en correspondance avec les besoins en eau des cultures. En revanche, les systèmes d'irrigation modernisés et à forte consommation d'énergie

nécessitent des considérations particulières en matière de conception, car leur fonctionnement est directement lié à la consommation d'énergie produite et stockée lorsqu'ils sont combinés à un système photovoltaïque [88].

Dans un système d'irrigation à pivot central, de l'énergie est nécessaire pour pomper l'eau au débit et à la pression souhaités, ainsi que pour faire fonctionner les moteurs d'entraînement du pivot pour faire transporter l'eau autour du champ d'irrigation, ce qui conduit à un système de puissance relativement élevée [89]. En outre, divers accessoires électriques tels que le moteur du mélangeur, la pompe d'injection des produits chimiques et engrais, le climatiseur pour la salle électrique abritant les équipements électriques tel que les onduleurs et autres (dans le cas de connexion à un système photovoltaïque) peuvent également ajoutées.

III.5. Efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie

La relation étroite entre l'irrigation et la productivité économique a fait que, ces dernières années, plusieurs stratégies visant à améliorer l'efficacité de l'eau ont été élaborées en partant du principe qu'il faut obtenir "plus de récoltes par goutte d'eau". Ces actions ont été divisées en deux domaines : (1) l'amélioration de l'infrastructure hydraulique, et (2) le développement de nouvelles pratiques agronomiques pour optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation [90].

L'expression "efficacité de l'utilisation de l'eau" est un terme général dans l'agriculture qui a plusieurs définitions en fonction de l'étendue des utilisations et des pertes d'eau étudiées. L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, a défini l'efficacité de l'utilisation de l'eau comme le rapport entre la production totale des cultures, sous la forme de matière sèche totale ou de produits commercialisables, et le volume total d'eau appliqué ou consommé.

L'efficacité de l'utilisation de l'eau en amont développe davantage l'idée de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et se concentre sur les apports totaux d'eau pour un système, et prend en compte les pertes dues au ruissellement, à la percolation en profondeur, à l'acheminement et à l'épandage. À partir de cette définition, il a été déterminé que si le rendement des cultures était tracé en fonction de l'apport total d'eau, la pente de la fonction résultante serait égale à l'efficacité de l'utilisation de l'eau en entrée.

L'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE) exprimée en kg/m^3 peut calculée sur la base du rendement commercialisable ou de la productivité de la culture (kg/ha) divisé

par la profondeur d'irrigation saisonnière totale appliquée utilisée par la culture (m^3/ha) comme indiqué dans l'équation [91].

$$IWUE = Y/Q \quad (\text{III.22})$$

Où Y est la productivité de la culture (kg/ha) et Q est l'eau utilisée par la culture (m^3/ha).

L'énergie est un facteur essentiel dans le processus d'irrigation, car elle est dépensée pour chaque unité d'eau pompée, ce qui signifie qu'une augmentation de l'utilisation de l'eau, dans un système d'irrigation spécifique, correspond à une augmentation proportionnelle de la consommation d'énergie. Toute eau non utilisée par la culture entraîne une réduction de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. À son tour, cette diminution de l'efficacité de l'utilisation de l'eau affecte directement l'efficacité de l'utilisation de l'énergie. En effet, lorsque l'eau n'est pas utilisée efficacement par les cultures, l'énergie investie dans le pompage de cette eau devient moins productive, ce qui entraîne une diminution globale de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie.

L'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans l'agriculture irriguée est un aspect essentiel des pratiques agricoles durables. Elle consiste à optimiser la quantité d'énergie utilisée pour l'irrigation tout en veillant à ce que les cultures reçoivent l'eau dont elles ont besoin pour prospérer. En améliorant l'efficacité énergétique, les agriculteurs peuvent réduire leurs coûts d'exploitation, préserver les ressources en eau et minimiser l'impact sur l'environnement.

L'efficacité énergétique ou la production d'énergie ont pu être estimées à l'aide d'indicateurs adaptés au système d'irrigation à pivot central [92]. Ces indicateurs ont été sélectionnés parmi ceux proposés par [90], [93] et ont été définis comme suit :

- (1) L'indicateur d'énergie spécifique E_s (kWh/m^3) est couramment utilisé pour évaluer l'efficacité énergétique de divers systèmes de distribution d'eau, où E_s est la quantité d'énergie électrique active (kWh) nécessaire pour pomper un volume d'eau standard ($1,0 \text{ m}^3$).
- (2) La puissance spécifique installée (kW/ha) est le rapport entre la puissance de la station de pompage (kW) et la surface totale irriguée (ha).

- (3) La consommation d'énergie par unité de surface irriguée (kWh/ha) est le rapport entre la consommation totale d'énergie dans les stations de pompage (kWh) et la surface irriguée (ha).
- (4) La consommation d'énergie par tonne produite (kWh/t) est la consommation totale d'énergie divisée par le rendement total de la culture.

III.6. Conclusion

Ce chapitre va de la compréhension des besoins en eau à la conception d'un système de pompage solaire PV et d'un pivot. En commençant par l'ETo et les besoins en eau des cultures à l'aide de CROPWAT, nous nous sommes penchés sur les considérations de dimensionnement, en explorant la hauteur de charge totale, les besoins en énergie et les éléments de conception critiques. La navigation dans les composants du système a ouvert la voie à une conception méticuleuse du système de pompage solaire photovoltaïque. Nous nous sommes ensuite concentrés sur la conception du pivot solaire, en mettant l'accent sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie. En conclusion, les fondements théoriques se transforment en douceur en mise en œuvre pratique, jetant les bases d'un système d'irrigation à pivot solaire durable et efficace. Ce chapitre sert de pont entre la théorie et l'application, et ouvre la voie à notre voyage empirique vers la durabilité agricole.

Deuxième partie

Expérimentation et dimensionnement

Chapitre IV

Etude de Terrain et Méthodologie de Recherche

Chapitre IV : Etude de Terrain et Méthodologie de Recherche

IV.1. Introduction

Le système d'irrigation à pivot central a été introduit en Algérie à la fin des années 1980 par l'intermédiaire de la Société Nationale ANABIB, avec sa succursale IRRAGRIS, à Bordj Bou Arreridj, en coopération avec la société autrichienne BAUER. Il a été adapté pour l'irrigation des céréales dans les régions sahariennes comme la région de Ouargla, ces pivots avaient une longueur de 350 à 400 m et pouvaient irriguer des surfaces de 39 à 50 ha [94]. Dans les années 1990, les artisans locaux de la région d'El Oued ont conçu un pivot plus petit, d'une longueur de 40 à 80 m, pour irriguer les cultures maraîchères sur des parcelles de 0,5 à 2 ha, notamment les pommes de terre [24]. Après la conception du système artisanal de mini-pivot central dans la région d'El Oued, les plus grands pivots mentionnés ci-dessus sont appelés localement pivots modernes. L'utilisation de sources d'énergie, en particulier d'un système d'énergie solaire, exige que l'utilisateur soit conscient des besoins totaux en énergie du système d'exploitation. Le choix des pratiques de gestion dans l'agriculture irriguée, en particulier l'estimation précise des besoins en eau, joue un rôle efficace dans l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

La structure du chapitre comprend une exploration de la zone d'étude et le processus de sélection des sites d'irrigation, détaillant les caractéristiques des sites choisis. Il décrit la méthodologie de collecte et d'analyse des données, y compris les méthodes d'analyse documentaire, les entretiens, les enquêtes et les mesures sur le terrain, ainsi présente l'organigramme de la méthodologie de recherche. Enfin, le chapitre présente une analyse approfondie du projet de pivot solaire de Timimoune, offrant un aperçu de sa mise en œuvre et de ses résultats dans le contexte de l'étude.

IV.2. Zone d'étude et sélection des sites d'irrigation

La zone d'étude étant déterminées (les deux Wilayas Ouargla et d'El Oued) situant dans le nord-est du sud de l'Algérie. Deux sites d'irrigation différents ont été choisis pour cette étude :

✚ **Le site [A]** est la daïra d'El-Hadjira qui fait partie de la Wilaya d'Ouargla (32.37° N, 5.31° E, 126 m) situé à 105 Km au Nord de la ville d'Ouargla et caractérisée par l'installation des pivots modernes de type ANABIB pour l'agriculture irriguée des céréalières.

✚ Le site [B] est la daïra de Hassi Khalifa qui fait partie de la Wilaya d'El-Oued (33.33° N, 6.59° E, 48 m) situé à 30 Km au Nord-est de la ville d'El Oued et caractérisée par une grande extension importante de la surface agricole sous pivot artisanal et par une population très attachée à l'activité agricole.

Les deux Figures IV.1 et IV.2 présentent respectivement la situation géographique du lieu d'études du site [A] et du site [B].

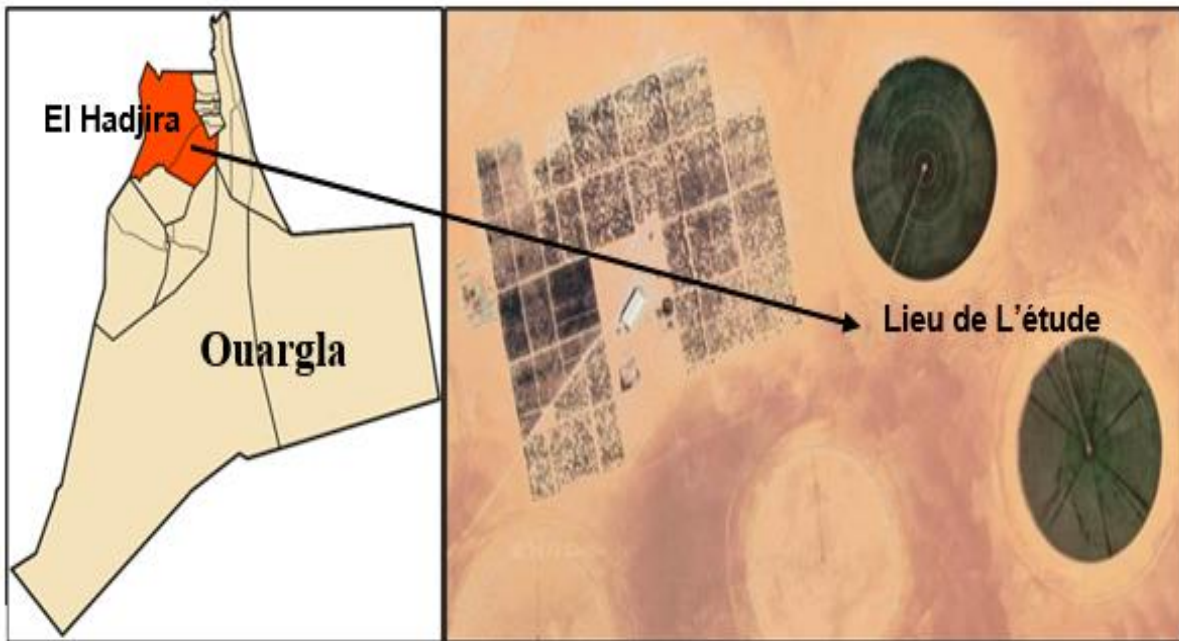


Figure IV.1 La situation géographique du lieu d'études du site [A]

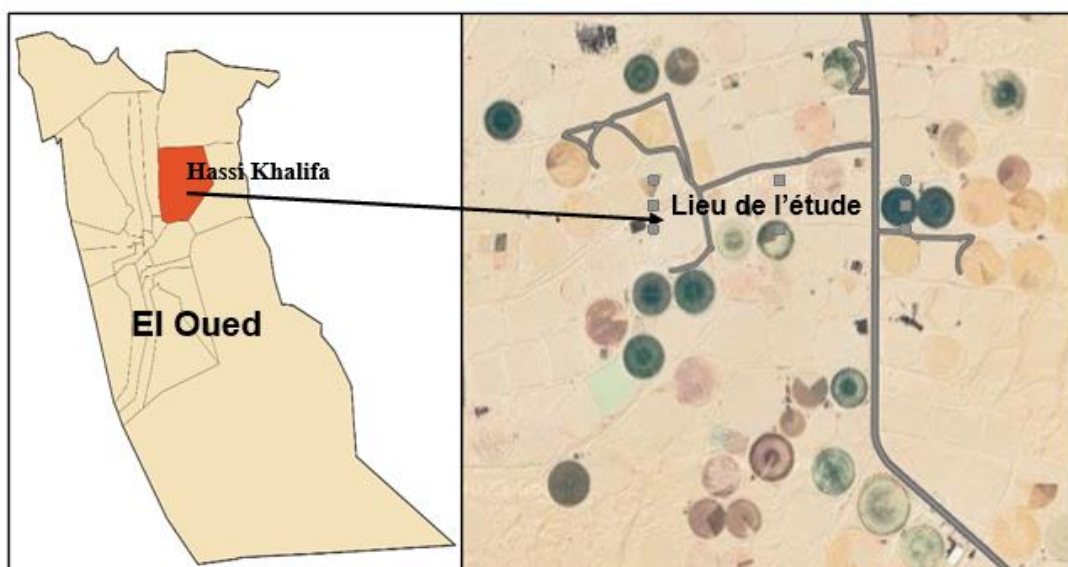


Figure IV.2 La situation géographique du lieu d'étude du site [B]

IV.2.1. Caractéristiques des sites

Les deux sites [A] et [B] ont un climat aride avec une température annuelle moyenne de 21°C et une faible pluviométrie annuelle moyenne de 77 et 73 mm, respectivement, de sorte que le processus d'irrigation est la seule source pour répondre aux besoins en eau des cultures. L'irrigation par aspersion est la méthode la plus populaire dans ces régions pour appliquer l'eau aux cultures au cours des deux dernières décennies.

IV.2.2. Justification des choix

Le site d'étude A a été choisi parce qu'il est le plus proche en termes d'exploitation du pivot d'irrigation moderne pour irriguer les cultures céréalières dans la wilaya d'Ouargla, tandis que le site d'étude B a été choisi parce qu'il est le pionnier dans l'exploitation du pivot artisanal et dans la production de la pomme de terre dans la wilaya d'El Oued.

IV.3. Collecte et analyse des données

IV.3.1. Méthode d'analyse documentaire

Une analyse documentaire complète a été entreprise afin d'acquérir une connaissance approfondie de la zone d'étude, de ses pratiques agricoles et de l'exploitation des eaux souterraines dans le secteur agricole, notamment après l'intégration des systèmes d'irrigation à pivot central. Diverses sources universitaires, documents de recherche et bases de données ont été consultés pour identifier les concepts et théories clés qui sous-tendent le cadre théorique de l'étude. La littérature analysée a servi de base à la recherche.

IV.3.2. Entretiens et enquêtes

Des entretiens en face à face ont été menés au cours de la période 2019-2020 avec des agriculteurs locaux et des parties prenantes afin d'obtenir des informations sur les pratiques agricoles réelles et les stratégies d'irrigation adoptées dans la zone d'étude. Dans un premier temps, les visites sur le terrain ont été généralisées pour interroger le plus grand nombre d'agriculteurs dans les deux zones d'étude afin de comprendre les variations possibles dans leurs stratégies agricoles.

Les critères de sélection des fermes pour l'étude étaient basés sur (1) l'existence de systèmes d'irrigation à pivot central, (2) la variabilité des cultures, (3) l'expérience agricole de leurs propriétaires parmi un grand nombre et la diversité des agriculteurs, en particulier dans le site B, pour adopter leur stratégie d'irrigation dans ce travail. Trois (3) fermes ont été sélectionnées, une ferme sur le site A et deux fermes sur le site B. Dans chaque ferme, deux machines pivot ont été sélectionnées. Deux grands pivots modernes sur la ferme de A, et quatre pivots artisanaux sur les deux fermes de B. Une saison de croissance par machine a été suivie pendant toute cette période sur les trois fermes.

Un questionnaire structuré a été conçu pour aborder un large éventail de sujets, notamment : la variété des cultures, calendrier de plantation et de récolte, pratiques agricoles, les pratiques d'irrigation artisanal appliquées (méthode d'irrigation des champs, fréquences et intervalles d'irrigation, et profondeurs d'application de l'irrigation), la longueur des stades de croissance des plantes, production, caractéristiques des ressources en eau de la ferme, et en outre, la source d'électricité utilisée. Ces entretiens ont fourni des données qualitatives précieuses qui ont complété les mesures quantitatives.

IV.3.3. Mesures sur le terrain et collecte de données

Dans le cadre de cette étude, des mesures approfondies ont été effectuées sur le terrain afin de recueillir des données essentielles relatives à la consommation de l'eau et de l'énergie, à la puissance installée dans les stations de pompage et au rendement des cultures. La procédure utilisée pour évaluer la consommation réelle d'eau et d'énergie dans les systèmes à pivot central était basée sur la mesure du débit et de la consommation électrique et sur le temps d'irrigation des activités des agriculteurs.

L'étude a été réalisée sur deux types de systèmes de pivot central, le grand pivot moderne ANABIB et le mini pivot artisanal de Souf (El Oued) (Figure VI.3).



Figure IV.3 Vue en images des deux types de systèmes à pivot central : moderne (à gauche) et artisanal (à droite).

L'un des systèmes d'irrigation par aspersion fournis par la société algérienne ANABIB est le système à pivot, qui constitue la méthode optimale pour irriguer de vastes étendues de terre, facilitant ainsi des pratiques agricoles sans faille et sans restriction.

Le pivot ANABIB étudié (Figure VI.3) a une longueur totale de 321 mètres, avec 6 travées d'une longueur de 52 mètres chacun et un port-à-faut sans canon d'extrémité de longueur 9 mètres. Le système est composé de tuyaux galvanisés de 160 mm de diamètre intérieur, avec les structures de poutrelles et de tours nécessaires. Le pivot est entraîné autour d'un point de pivot fixe, situé au centre du champ, par six moteurs électriques de 740 watts chacun et des systèmes d'entraînement par boîte de vitesses, un sur chaque tour.

Deux pivots ont été sélectionnés pour l'étude dans l'exploitation retenue sur le site A (El-Hadjira) (Figure VI.1). Les deux pivots d'irrigation sélectionnés ont été plantés avec deux cultivars locaux de céréales, le blé tendre et l'orge, semés respectivement le 1er novembre 2019 et le 1er octobre 2019 (Tableau VI.1)

Tableau IV.1. Variétés et Date de plantation des cultures du site [A]

Pivot	Culture	Variété	Date de plantation	Superficie irriguée (ha)
(1)	Blé	Locale	Le 1 ^{er} novembre 2019	32.8
(2)	Orge	Locale	Le 1 ^{er} octobre	32.8

Le deuxième type est le mini pivot artisanal fabriqué par les artisans du site B (Hassi Khalifa), dans lequel quatre dispositifs ont été choisis avec une surface irriguée de 1,2 ha pour chacun d'eux. La classification des pivots artisanaux étudiés et les cultures irriguées par ceux-

ci sont illustrées dans le Tableau VI.2. Ces quatre cultures constituent les principales cultures irriguées par le pivot artisanal où la pomme de terre occupant la première place.

Tableau IV.2. Variétés et date de plantation des cultures du site [B]

Pivot	Culture	Variété	Date de plantation	Superficie irriguée (ha)
(3)	Pomme de terre	"spunta" (origine : Pays-Bas)	Le 15 août 2019	1.2
(4)	Oignon rouge	D'origine espagnole	Le 1er novembre 2019	1.2
(5)	Ail	Locale	Le 1er septembre 2019	1.2
(6)	Arachides	Locale	Le 1er mai 2020	1.2

Quant aux oignons, les graines ont été initialement plantées le 10 septembre 2019, et elles ont été plantées sous une autre machine à pivot située sur le site pour assurer la formation de la culture appropriée, et elles ont ensuite été replantées dans le pivot central désigné pour l'étude le 1er novembre 2019.

Les caractéristiques du pivot ANABIB, telles que la vitesse de la tour d'extrémité et le débit du système, sont données par le fabricant, mais des tests ont été effectués pour s'assurer que des valeurs exactes étaient utilisées dans les calculs. Dans le cas des mini pivots artisanaux, les mesures ont été effectuées pour la première fois. Le contrôle continu des caractéristiques des pivots tout au long de la saison pour les utiliser dans les calculs a été difficile en raison de l'absence d'équipement d'enregistrement des données automatiquement et de la difficulté de déplacement. Au lieu de cela, des tests ont été effectués plusieurs fois afin d'établir une généralisation fiable des caractéristiques du débit de chaque système. Ces généralisations ont ensuite été utilisées pour calculer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de l'énergie.

La vitesse de la tour d'extrémité joue un rôle crucial dans la détermination du temps de rotation complet d'un système à pivot central et de la profondeur d'application lors de chaque passage. Les tests effectués pour déterminer la vitesse de la tour finale du pivot moderne et de la tour unique du mini pivot ont consisté en mesurant une longueur définie à l'aide d'un ruban à mesurer le long de la trajectoire des roues motrices et en enregistrant le temps nécessaire à chaque pivot central pour parcourir la distance. On pensait qu'étant donné que la vitesse de tour d'extrémité (aussi la tour unique du mini pivot) est constante, une augmentation de l'humidité de la surface pourrait entraîner une augmentation du glissement des pneus, mais cela n'a pas

été le cas. Ce test a toutefois été réalisé sur un terrain relativement plat ; le glissement dû à l'humidité de la surface peut augmenter au fur et à mesure que l'inclinaison augmente.

La deuxième caractéristique permettant de déterminer la consommation de l'eau est le débit de la pompe. Faute de pouvoir obtenir et configurer des débitmètres numériques, nous avons adopté la procédure de "mesure du débit volumétrique" pour mesurer le débit de la pompe. Il s'agit d'une méthode simple et précise pour mesurer le débit d'un liquide. Pour effectuer une mesure de débit volumétrique, nous avons besoin d'un récipient gradué et d'un chronomètre. Pour obtenir des résultats précis lors de la mesure du débit volumétrique, nous avons utilisé un récipient gradué d'un volume suffisamment grand (1m³) (Voir Annex A) et un chronomètre et nous avons répété l'expérience trois fois, en adoptant la moyenne des résultats.

Tous les pivots étudiés utilisent le réseau électrique triphasé pour faire fonctionner le groupe de pompage et les moteurs d'entraînement pour déplacer la machine. La demande de puissance du système d'irrigation pivot central correspond à la vitesse à laquelle l'énergie est extraite de la source électrique pour fonctionner la station de pompage et propulser le système lorsqu'il se déplace dans le champ autour du point de pivot fixe. Dans le contexte d'un système électrique, la puissance absorbée est calculée comme la multiplication de la tension et du courant absorbés, tandis que l'énergie est essentiellement une mesure de la puissance absorbée sur une période de temps. Pour évaluer les besoins en puissance et en énergie des systèmes d'irrigation l'analyseur d'énergie électrique du réseau triphasé CHAUVIN ARNOUX (C. A.8332B) a été utilisé.

Les résultats des mesures sont multipliés par le temps d'irrigation et on obtient la consommation électrique totale de l'activité d'irrigation comme présenté dans l'Equation VI.1. Pour les pivots modernes, le temps total passé aux différents pourcentages avec lesquels la machine a été réglée est pris en compte. Comme la topographie de tous les champs sur lesquels les machines d'irrigation sont situées est plate, le débit de la pompe et la consommation d'énergie électrique des systèmes d'irrigation étudiés peuvent être considérés comme constants dans le temps.

$$E = P * Ti \quad (VI.1)$$

Où E est l'énergie consommée par le système de pivot central (kWh) ; P est la puissance consommée par le système de pivot central (kW); Ti est le temps total d'irrigation des cultures (h).

Les rendements des cultures à deux céréales sont fournis pour chaque champ à partir des enregistrements de récolte de la machine. Pour les autres cultures, la récolte est manuelle, et le rendement de chaque culture est fourni après la récolte lorsqu'il est commercialisable.

Le sol agricole des sites A et B est classé comme sableux (83% à 97% de sable), très pauvre en matière organique et en azote [95], [96], c'est pourquoi les fichiers de sol de la FAO (Light Sand) ont été pris en compte dans le modèle, car ils coïncident avec les propriétés du sol dans la zone d'étude. Dans les deux sites le sol est sableux de données générales eau disponible totale (TAM) 50 mm/m, le taux d'infiltration maximal est 40 mm/j, la profondeur d'enracinement maximale est 900 cm, l'épuisement initial de l'humidité du sol en tant que % TAM est 100, et l'humidité du sol disponible initiale zéro mm/ m.

Les données relatives aux cultures ont été obtenues à partir du Manuel 56 de la FAO et ont été ajoutées au programme CROPWAT 8.0, y compris la profondeur d'enracinement, le coefficient de culture, l'épuisement critique, le facteur de réponse au rendement et la longueur des stades de croissance des plantes [97].

En ce qui concerne les coefficients culturaux, il n'existe pas à ce jour de données spécifiques sur ces coefficients pour les deux sites A et B. Ceci fera l'objet d'une étude future qui comprendra également une détermination des rendements des cultures sous différents régimes d'irrigation. Nous avons donc adopté les valeurs indiquées dans la publication 24 de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). 24. Tant qu'il n'y a pas d'études sur l'évapotranspiration et les coefficients de culture (Kc) ont été rapportés dans les deux sites A et B, Allen et al. [62] ont suggéré que le Kc donné dans la publication 24 de la FAO pourrait être utilisé dans toutes les conditions météorologiques où les données expérimentales ne sont pas disponibles. Nous pensons que les valeurs de Kc utilisées aident à estimer les besoins en irrigation dans un endroit où l'application d'eau d'irrigation est traditionnellement faite. Les coefficients de culture et la longueur de chaque stade de croissance des différentes cultures sont présentés dans la Figure IV.4.

. Les profondeurs totales de l'eau d'irrigation appliquées par les planifications traditionnelles ont été déterminées sur la base des informations fournies par les agriculteurs et par les observations sur le terrain. La quantité mensuelle d'eau (ou pour chaque stade de croissance) utilisée par chaque culture a été calculée en multipliant le débit de la pompe à

l'entrée du système par le temps d'irrigation (volume d'eau prélevé par heure multiplié par le nombre d'heures de fonctionnement du système pendant l'irrigation).

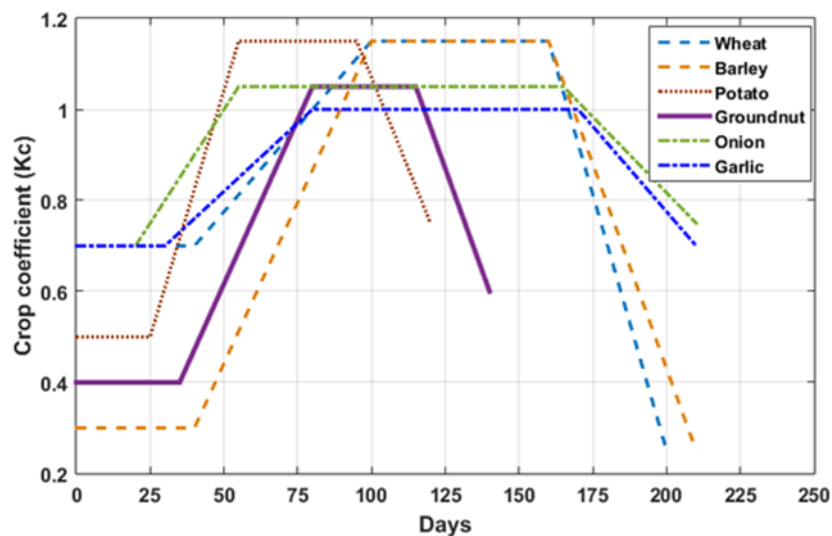


Figure IV.4 Stades de culture, durée de la période de croissance en jours et coefficients de culture

Dans notre recherche, nous avons exploité les capacités de CROPWAT pour estimer les besoins optimaux en eau de variétés de cultures spécifiques dans notre zone d'étude et la meilleure programmation de l'irrigation. Ces estimations ont servi de points de référence précieux, nous permettant d'évaluer si l'application réelle de l'eau dans nos expériences sur le terrain correspondait aux besoins en eau calculés des cultures.

Les températures maximales et minimales en °C, l'humidité relative quotidienne moyenne (%), les heures d'ensoleillement, la vitesse quotidienne moyenne du vent en km/j, et les données mensuelles sur les précipitations sont les données climatiques d'une moyenne à long terme sur une période de 40 ans (1975-2014) obtenues à partir de CLIMWAT 2.0, base de données climatiques pour CROPWAT.

En raison de l'absence de stations climatiques dans le site A (El Hadjira), la station météorologique de Touggourt a été retenue pour lui présenter les données climatiques. La station météorologique d'El Oued n'est pas référencée dans la base de données CLIMWAT 2.0, leurs données climatiques ont été introduite manuellement dans CROPWAT 8.0 pour représenter le site B (Hassi Khalifa).

Excel a été utilisé comme principal outil d'analyse des données. Divers calculs et analyses statistiques ont été effectués, notamment l'évaluation de la consommation d'énergie et les comparaisons entre les données mesurées sur le terrain et les résultats de CROPWAT 8.0. Le logiciel a également facilité la création de diagrammes et de graphiques pour visualiser les principaux résultats et tendances.

IV.4. Organigramme de l'approche de recherche

Il s'agit d'une étude visant à étudier la programmation de l'irrigation traditionnelle dans une zone spécifique pour le système d'irrigation par pivot et la possibilité de l'intégrer à l'énergie photovoltaïque. Pour ce faire, une approche d'étude de cas est utilisée :

1. Estimer les besoins en eau des cultures importantes (blé, orge, pomme de terre, oignon, ail et arachide) à l'aide du logiciel CROPWAT 8.0 sur la base des données climatiques des sites d'étude.
2. Calculer la consommation réelle d'eau et d'énergie électrique dans les systèmes à pivot central modernes et artisanaux gérés dans le cadre d'une planification traditionnelle de l'irrigation par les agriculteurs, par le biais d'un travail expérimental sur le terrain.
3. Comparer ces deux types de pivot d'irrigation à l'aide d'indicateurs de performance énergétique.
4. Dimensionnement de la station photovoltaïque appropriée pour les deux types de pivot d'irrigation à l'aide du logiciel PVsyst.

Le cadre méthodologique adopté pour l'étude est brièvement décrit dans la Figure IV.5 ci-dessous.

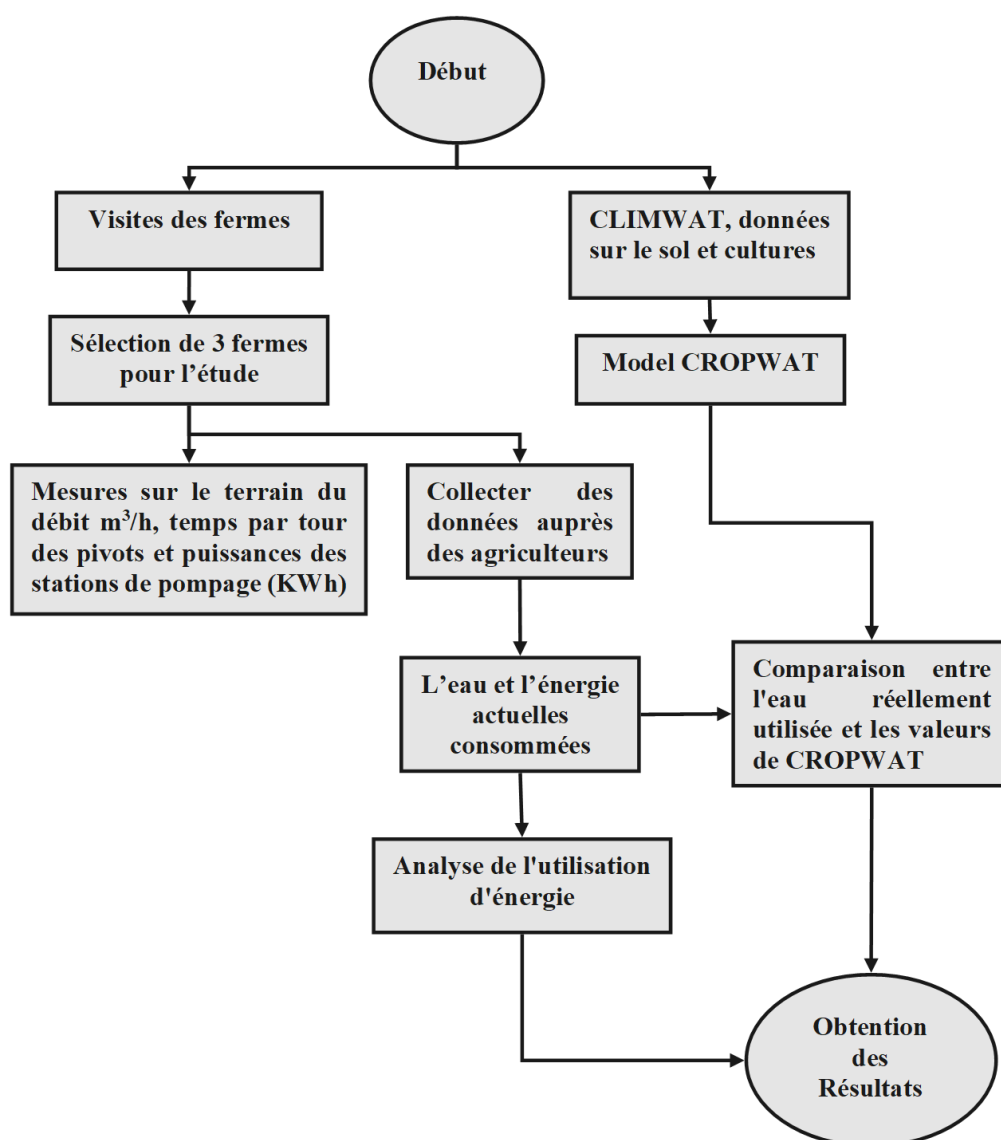


Figure IV.5 L'organigramme du travail, étape par étape

IV.5. Projet de pivot solaire à Timimoune

En 2022, nous avons eu l'honneur d'être présents au cours de l'installation du premier central solaire photovoltaïque pour alimenter le dispositif d'irrigation à pivot central (ZIMMATIC) avec de l'énergie verte (Figure IV.6). Cette étape s'inscrit dans le cadre d'un vaste projet d'exploitation de l'énergie solaire renouvelable visant à irriguer une surface de 7000 hectares. Cette réalisation a été confiée à la SARL AGRI SUN et à la SPA AMAIS. Ce projet vise à généraliser l'utilisation de l'énergie solaire dans les systèmes d'irrigation à pivot central, populaires et bien accueillis dans l'agriculture du sud de l'Algérie.

Le central solaire PV en question sert à alimenter une paire de système d'irrigation à pivot central de marque ZIMMATIC. Chacun des deux pivots irrigue une superficie de 25 hectares (5 travées et 5 moteurs) et partage le même puits avec une pompe submersible. Les équipements alimentés par le central solaire PV :

- Une pompe submersible d'une puissance de 150 chevaux (112 kW),
- Dix motoréducteurs qui font partie intégrante des deux pivots et produisent chacun $\frac{3}{4}$ chevaux (0,55 kW),
- Un climatiseur pour refroidir la salle de l'onduleur (2 kW, 220 V),
- Le moteur de mélange et la pompe d'injection chimique d'une puissance combinée de 5 kW, qui s'acquittent de la tâche de mélanger et de distribuer des engrais et des traitements chimiques, nourrissant les cultures.



Figure IV.6 La nouvelle station PV destinée à alimenter deux pivots

Le projet vise à installer 354 systèmes d'irrigation à pivot central et à les couvrir en énergie solaire PV selon la description mentionnée ci-dessus. Chaque puits alimente deux pivots ZIMMATIC (c'est-à-dire 177 paires de pivot et puits). Jusqu'à présent, quatre stations PV ont été installées avec une puissance totale de 624 kWc.

La station photovoltaïque est divisée en deux parties :

- 1^{ère} partie de la station PV : Système hybride est dédiée à la pompe (Système PV plus générateur diesel de secours),
- La deuxième est de type autonome dédiée aux autres équipements mentionnés ci-dessus.

Le système de pompe solaire hybride est basé sur un onduleur de 110 kW (Figure IV.7) conçu pour les applications de pompage d'eau solaire. L'onduleur de pompage gère l'intégration de l'énergie solaire et du générateur diesel de secours, assurant le fonctionnement continu du système d'irrigation.



Figure IV.7 Onduleur (110kW) de pompe solaire hybride

La station est équipée d'un générateur diesel de secours d'une capacité de 300 kVA qui remplace le réseau afin de fournir une énergie fiable et durable pour les opérations d'irrigation. Lorsque la production solaire est suffisante, le système fonctionne uniquement grâce à l'énergie renouvelable ; toutefois, si la production solaire est insuffisante, le générateur de secours s'active automatiquement pour compléter l'alimentation électrique. Les principaux objectifs sont d'évaluer la faisabilité technique, la viabilité économique et les performances opérationnelles de cette approche hybride PV-générateur pour l'alimentation de l'irrigation à pivot central hors réseau, en comparaison avec les systèmes traditionnels à diesel uniquement ou connectés au réseau. La Figure IV.8 illustre les différents composants de ce système PV hybride.

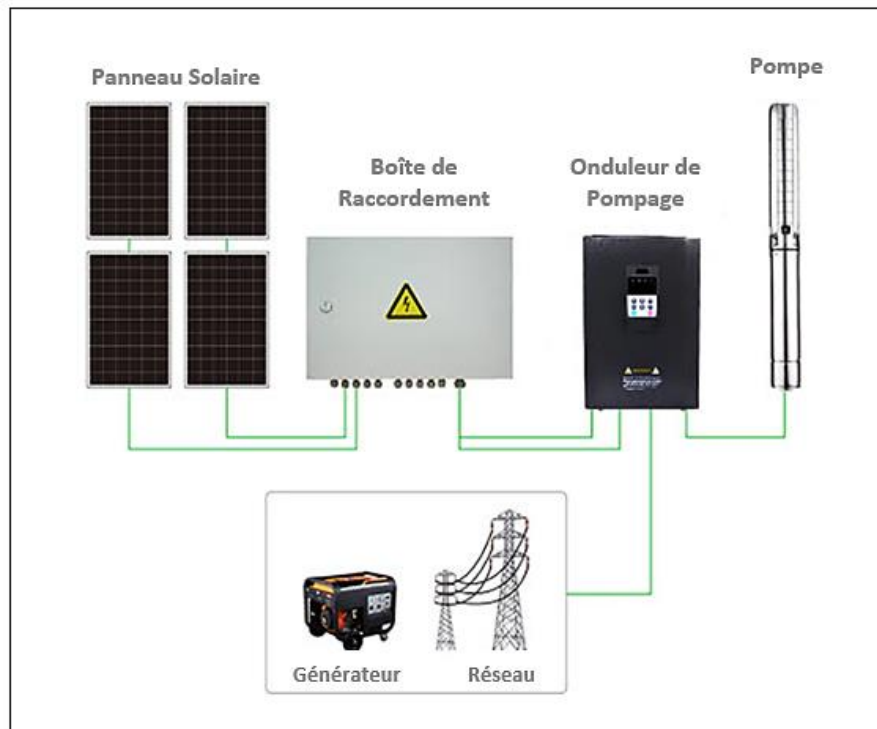


Figure IV.8 schéma de système de pompage solaire PV hybride

Dans la partie autonome de la station PV de 15 kWc trois onduleurs mono phase de 5 KW chacun (Figure IV.9) sont installés avec leur propre rangée de panneaux solaires et banque de batteries. Ce système PV combine deux bénéfices, l'utilisation total de l'énergie renouvelable et le stockage de l'énergie pour le fonctionnement du pivot pendant la nuit (et dont la pompe pendant la nuit est alimentée par le générateur diesel) et la continuité du fonctionnement du climatiseur de la chambre de l'onduleur.



Figure IV.9 Onduleurs monophasés pour le système PV autonome

La station solaire photovoltaïque contient dans l'ensemble 441 modules PV (400W) couvrant une surface de 1500 mètres carrés pour générer la puissance de 176 kW. Les responsables de ce projet cherchent à rendre cette station solaire flexible, efficace et capable de faire fonctionner les opérations agricoles de manière fiable en l'absence de réseau électrique public. Des autres figures sur ce projet sont présentées dans l'Annexe D.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble de la zone d'étude, décrivant les critères de sélection des sites d'irrigation et les raisons qui ont motivé les choix effectués. Il s'est ensuite penché sur les subtilités méthodologiques de la collecte de données, en utilisant l'analyse documentaire, les entretiens, les enquêtes et les mesures sur le terrain. Un aspect crucial mis en évidence dans ce chapitre est la présentation des dispositifs d'irrigation à pivot central étudiés, mettant en lumière les cultures de valeur irriguées par eux.

L'intégration du programme CROPWAT dans notre méthodologie d'évaluation de la consommation optimale d'eau a ajouté une dimension précieuse à notre approche. Les connaissances acquises dans ce chapitre jettent les bases d'une compréhension approfondie du contexte de l'étude, préparant ainsi le terrain pour les analyses et discussions dans le chapitre suivant. En fin une description complète du projet de Timimoune pour l'installation des stations PV destinées à l'alimentation des pivots d'irrigation a été présenté, ce qui est considéré comme un tournant vers l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur agricole du grand sud algérien.

Chapitre V

Résultats et discussion

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1. Analyse des Besoins en Eau

V.1.1. Les données climatiques et évapotranspiration

Les données CROPWAT 8.0 et les résultats du logiciel CLIMWAT 2 pour les données climatiques et l'ET₀ au cours de la période d'étude pour les deux sites A et B sont résumés dans les Tableaux V.1 et V.2 respectivement. Les valeurs moyennes de l'humidité relative étant de 68 % et 52 % dans A et B, respectivement. Les températures minimales moyennes mensuelle étaient de 14.1 °C et 14,4 °C dans A et B respectivement (Tableaux V.1 et V.2), tandis que les températures maximales moyennes étaient de 28.7 °C et 26,9 °C dans A et B, respectivement. Il semble que les valeurs des températures minimales et maximales dans les deux sites soient proches. La vitesse moyenne du vent était 191Km/j (7.985 km/h) dans le site A et 223Km/j (9.292 km/h) dans le site B. La différence d'humidité relative moyenne dans A et B reflète les différences de vitesses moyenne du vent. Le nombre moyen d'heures d'ensoleillement était de 8,8 et 7,7 dans A et B, respectivement. Les valeurs moyennes mensuelles du rayonnement solaire étaient de 18,9 et 17,3 (MJ/m²/j) (1kWh=3.6MJ) dans A et B respectivement, ce qui était idéal pour la croissance des cultures étudiées (Tableaux V.1 et V.2).

Tableau V.1. Données climatiques, précipitations et ET₀ du site A (Altitude 80 m, Latitude 33.06 N, Longitude 6.04 E)

Moi	Tem. Min. (°C)	Temp. Max. (°C)	Humidité Rel. (%)	Vitesse du vent (Km/j)	Insolation (h)	Radiation (MJ/m ² /j)	ET ₀ (mm/j)	Préc. (mm)	Préc. Eff. (mm)
Jan.	3.3	16.7	79	164	6.6	11.2	1.50	15.0	0.0
Fév.	5.6	19.4	75	216	8.2	15.1	2.32	3.0	0.0
Mar.	8.9	23.3	69	251	8.5	18.6	3.52	7.0	0.0
Avr.	12.8	28.3	67	251	9.0	21.8	4.75	4.0	0.0
Mai	17.2	32.8	61	251	10.3	25.0	6.17	12.0	0.0
Juin	22.8	37.8	59	251	10.1	25.1	7.18	1.0	0.0
Juil.	25.0	41.7	46	156	11.4	26.7	7.58	1.0	0.0
Août	23.9	40.5	59	156	10.9	24.9	6.86	0.0	0.0
Sep.	21.1	36.1	60	147	9.6	20.8	5.42	4.0	0.0
Oct.	15.0	28.9	71	164	7.9	15.6	3.53	4.0	0.0
Nov.	8.9	22.2	85	147	6.6	11.7	1.91	8.0	0.0
Déc.	4.4	17.2	87	138	6.6	10.5	1.29	18.0	0.8
Moy.	14.1	28.7	68	191	8.8	18.9	4.34	-	-
Tot.	-	-	-	-	-	-	-	77.0	.08

Temp. Min., température minimale moyenne mensuelle ; Temp. Max., Température maximale moyenne mensuelle ; Préc. Eff., précipitation effective.

Tableau V.2 Données climatiques, précipitations et ETo du site B (Altitude 63 m, Latitude 33.29 N, Longitude 6.47 E)

Mois	Temp. Min. (°C)	Temp. Max. (°C)	Humidité Rel. (%)	Vitesse du vent (Km/j)	Insolation n (h)	Radiation n (MJ/m ² /j)	ETo (mm/j)	Préc. (mm)	Préc. Eff. (mm)
Jan.	4.5	15.8	65	207	6.3	10.7	1.87	10	0.0
Fév.	6.8	19.0	63	233	6.5	13.1	2.60	8.0	0.0
Mar.	9.3	22.0	54	311	7.0	16.5	4.06	13	0.0
Avr.	12.7	25.7	49	277	7.0	18.8	5.04	10	0.0
Mai	17.6	31.1	46	277	8.8	22.8	6.57	5.0	0.0
Juin	21.7	34.8	45	242	8.9	23.3	7.07	3.0	0.0
Juil.	24.3	39.1	40	216	10.4	25.2	7.92	00	0.0
Août	24.6	38.3	45	190	9.7	23.0	7.05	2.0	0.0
Sep.	20.7	32.8	45	156	8.1	18.6	5.23	7.0	0.0
Oct.	15.7	27.6	52	190	7.0	14.4	4.01	9.0	0.0
Nov.	10.0	21.2	55	190	6.5	11.4	2.76	12	0.0
Déc.	5.0	15.6	63	190	5.9	9.7	1.83	10	0.0
Moy.	14.4	26.9	52	223	7.7	17.3	4.67	-	-
Total	-	-	-	-	-	-	-	89.0	0.0

Temp. Min., Température minimale moyenne mensuelle ; Temp. Max., Température maximale moyenne mensuelle ; Préc. Eff., précipitation Effective

Les valeurs de l'ETo dans A vont de 1,29 mm/j en décembre à 7,58 mm/j en juillet, tandis que dans B, elles vont de 1,83 mm/j en décembre à 7,92 mm/j en juillet. L'ETo moyen dans A était de 4,34 mm/j et celui de B de 4,67 mm/j (Tableaux V.1 et V.2). Les raisons qui expliquent les valeurs élevées de l'ETo dans B par rapport à A pendant la saison estivale sont une température élevée, une faible humidité relative, un nombre élevé d'heures d'ensoleillement et un rayonnement élevé.

V.1.2. Comparaison des besoins en eau réels et optimaux

Les cultures agricoles irriguées par les systèmes de pivot central dans les zones d'étude sont les céréales, le fourrage, les pommes de terre et divers types de légumes.

La planification traditionnelle de l'irrigation est la méthode traditionnelle de programmation des agriculteurs pour leurs applications d'irrigation, qui se base sur l'expérience

antérieure pour déterminer le moment de l'irrigation et les profondeurs d'application. Par conséquent, les applications d'eau gérées par les agriculteurs sont traditionnellement déterminées en fonction des conditions climatiques (saison de l'année) et du stade de croissance des plantes. La plupart des agriculteurs participent aux pratiques agricoles, qui sont représentées par le labourage de la terre avant la plantation et l'utilisation de la fertilisation par le fumier organique et minéral car le sol sablonneux est pauvre en matériaux, ainsi que l'utilisation de pesticides agricoles lorsqu'une maladie apparaît sur la plante, mais ils diffèrent légèrement dans la programmation de l'irrigation.

Les quantités d'eau d'irrigation actuellement appliquées aux cultures par la planification d'irrigation conventionnelle et les besoins en eau des cultures (CWRs) simulées à l'aide du programme CROPWAT 8.0 pour les deux sites A et B sont données par les Figures V.1 et V.2 respectivement.

Les Figures V.1 et V.2 montrent clairement que l'eau d'irrigation est souvent supérieure aux besoins des cultures (Dans la Figure V.1 et V.2, les stades de croissance des cultures sont désignés par, Init : initiale ; Dev : développement ; Mid : Mi-saison ; Late : fin de saison). Une sur-irrigation a été observée avec de grandes quantités d'eau appliquées pendant le stade initial du blé et de l'orge et au stade tardif de l'orge. En particulier, dans l'oignon et l'ail, la sur-irrigation a été remarquée à tous les stades de croissance. Une mauvaise gestion de l'irrigation entraîne soit une faible productivité des cultures, soit un gaspillage d'énergie et d'eau. Ainsi, une programmation adéquate de l'irrigation permet de réaliser des économies substantielles d'eau et d'énergie.

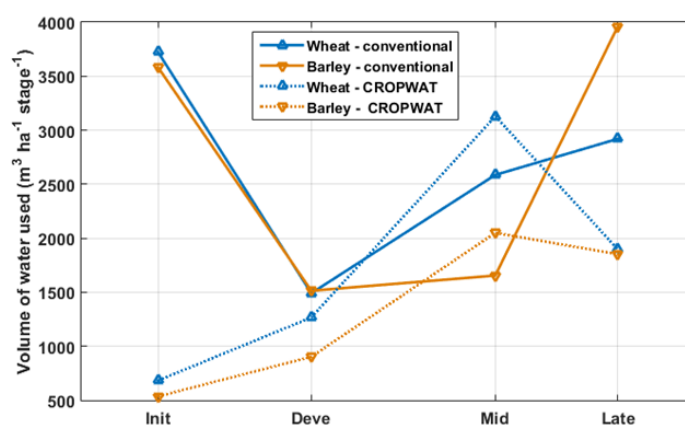


Figure V.1. Volume d'eau utilisé en fonction des stades de croissance des cultures pour l'irrigation traditionnelle et les résultats simulés de CROPWAT (m³) pour le site A

Dans l'irrigation par réseau d'eau sous pression, le pompage pour la distribution de l'eau et l'extraction des eaux souterraines sont les principales sources de consommation d'énergie [99], de plus, l'énergie allouée au pompage de l'eau dans l'exploitation est estimée à 23-48% de l'énergie utilisée directement pour la production agricole [100]. D'après les chiffres illustrés ci-dessus dans les Figures V.1 et V.2, on peut noter que la planification de l'irrigation traditionnelle dans les deux zones d'étude est caractérisée par un excès d'eau appliquée. Cependant, selon le point de vue des agriculteurs étant donné que le sol est sablonneux, il faut appliquer plus d'eau pour maintenir la disponibilité en eau du sol dans une gamme optimale tout au long de la saison de croissance pour une productivité et une qualité maximale des cultures, car les cultures ne peuvent pas tolérer le stress hydrique. Bien qu'il y ait une certaine limite (niveau seuil) à laquelle les plantes peuvent supporter le stress hydrique sans provoquer une diminution significative de la croissance et du rendement des plantes, et par conséquent une augmentation du niveau de l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE), mais ce seuil ne peut être déterminé qu'en ayant une compréhension plus profonde de la réponse des plantes au stress hydrique [101].

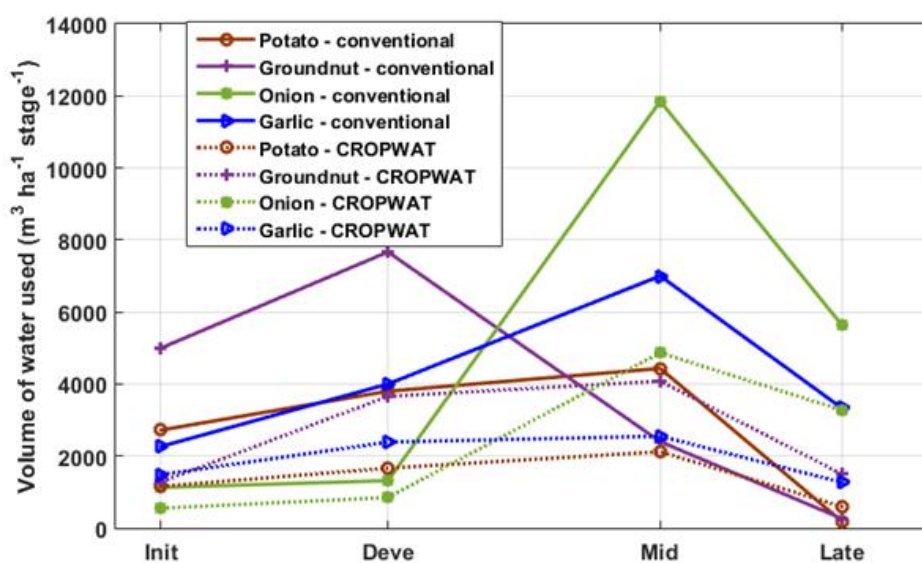


Figure V.2. Volume d'eau utilisé en fonction des stades de croissance des cultures pour l'irrigation artisanal et les résultats simulés de CROPWAT (m³) pour le site B [98]

V.2. Impact de l'Irrigation sur la Croissance des Cultures

V.2.1. Étude de cas : blé et pomme de terre

La figure V.3 [98] illustre la différence entre le volume d'eau appliqué en irrigation traditionnelle et celui calculé par le programme CROPWAT pendant les différents stades de croissance des cultures.

L'analyse portera sur les deux principales cultures irriguées, le blé et la pomme de terre ont été pris en compte, qui sont les deux cultures céréalières et maraîchères les plus importantes du pays en termes de superficie et de productivité, ainsi qu'en termes de valeur économique et de nutrition nécessaire. L'influence du niveau d'approvisionnement en eau sur les différents stades de croissance de la culture dans les deux champs qui ont été considérés comme bien fertilisés et bien traités en ce qui concerne la lutte chimique contre les ravageurs. Le programme CROPWAT a été pris comme référence pour la comparaison (voir Figure V.3) et la différence dans le volume d'eau d'irrigation appliqué a été prise comme un pourcentage (%) des valeurs calculées par le programme CROPWAT.

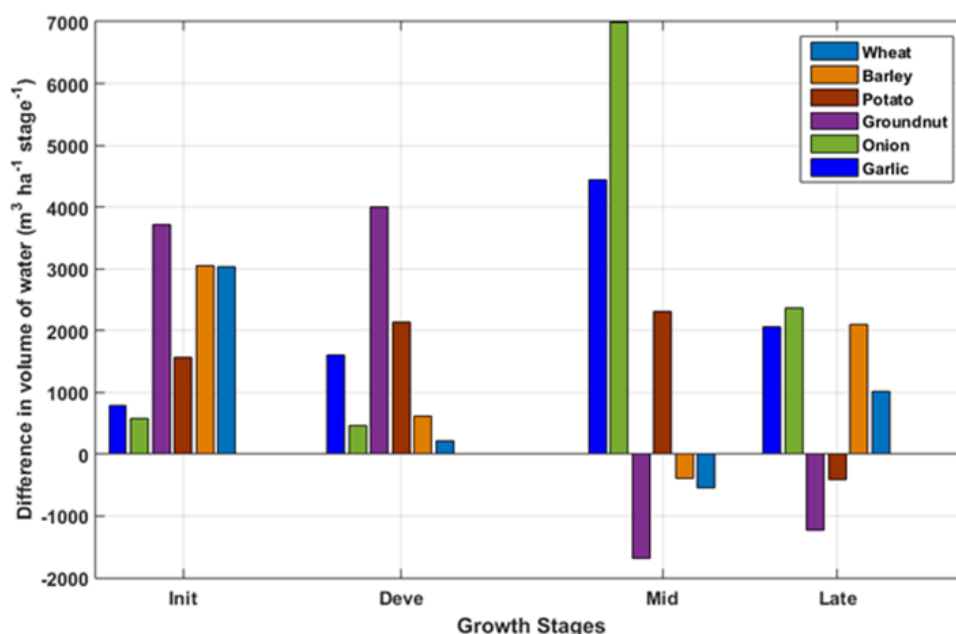


Figure V.3. Différence entre les quantités d'eau appliquées dans la planification artisanal et les valeurs du modèle CROPWAT pour les différents stades de croissance des cultures [98]

Le blé

Les investisseurs en céréales du site [A] appliquent l'irrigation en fonction des mois de la saison. Le Tableau V.3 montre la planification d'irrigation traditionnelle pour le blé. En comparant la planification d'irrigation traditionnelle avec la planification CROPWAT, comme le montre la Figure V.3, il apparaît qu'il y a une différence dans le volume d'eau à tous les stades de la croissance des plantes. Pendant la phase initiale (tallage) qui a duré 40 jours, les apports d'eau ont été très élevés avec un excès de 445%. Les apports d'eau semblent être extrêmement exagérés à ce stade de croissance, de plus, le mérite direct de l'économie d'eau, l'absence d'irrigation après le semis peut conduire à une meilleure croissance des racines profondes, ce qui favorise l'absorption de plus d'eau des couches plus profondes du sol [102]. En fait, en raison de la basse température et de la faible surface foliaire à ce stade du blé d'hiver, la consommation d'eau des cultures est faible et la plupart de l'évapotranspiration se fera par l'évaporation du sol, alors ces cultures ont montré à ce stade de croissance une faible réponse au stress hydrique water [103].

Pendant la phase de développement (extension de la tige) qui dure 60 jours, une sur-irrigation de 17% a été appliquée. Si l'irrigation aux stades précédents de la culture était correcte ou déficitaire, l'augmentation du volume d'eau à ce stade peut donc ne pas avoir d'impact important sur la culture, car il s'agit d'un gaspillage d'eau et d'énergie. Un déficit hydrique de 17% pendant la phase de mi-saison (épiaison) de 60 jours a été observé. Cette phase appartient à la période la plus sensible au stress hydrique, qui est l'élongation des tiges au moment de l'épiaison, suivie par la floraison ou le remplissage des grains [103]. La dernière phase (maturité) de 40 jours a été soumise à un excès d'irrigation de 53%. Zhang et al. [103] ont constaté que le rendement en grain du blé dépend non seulement de l'utilisation totale de l'eau pendant la saison de croissance, mais aussi de l'utilisation de l'eau pendant les différents stades de croissance.

Tableau V.3 Planification traditionnelle de l'irrigation du blé d'hiver

Pivot	Mois	Intervalle d'irrigation (Jours)	Profondeur d'irrigation par application (mm)	Nombre d'irrigations	Régulations %
1	Nov.	0*	5.8	60 †	100
	Déc.	3	7.3	10	80
	Jan.	3	7.3	11	80
	Fév.	3	8.3	9	70
	Mars	3	8.3	10	70
	Avr.	0*	11.7	30 †	50
	Mai	0*	11.7	5 †	50

Note : *Irrigation permanente 24/24, † : Nombre de tours du système

La pomme de terre

La méthode d'irrigation traditionnelle de la pomme de terre consistait en 12.6 à 19 mm/irrigation, avec 20 irrigations (irrigations fréquentes) pendant la phase initiale (sur 25 jours, soit 272.3 mm), 30 irrigations pendant la phase de développement (sur 30 jours, soit 380 mm), et 25 irrigations pendant la phase de mi-saison (sur 40 jours, soit 443.3 mm). L'irrigation a été arrêtée, avec un seul arrosage à la fin de la saison (soit 19 mm).

La Figure V.3 montre une application d'eau plus élevée pendant les trois premiers stades de croissance de la pomme de terre et un déficit pendant le quatrième stade. L'augmentation de la quantité d'irrigation appliquée à la culture était de 134% ; 128% ; 110% de la quantité optimale simulée par le modèle CROPWAT, pour les stades de croissance 1, 2 et 3 respectivement, et elle a diminué de 68% au dernier stade de croissance. Les pommes de terre, dont les racines sont relativement peu profondes, peuvent être considérées comme plus sensibles au stress hydrique que la plupart des autres cultures, mais leur rendement et leur qualité sont également sensibles à l'excès d'eau dans le sol, où la saturation du profil du sol pendant plus de 8 à 12 heures peut causer des dommages aux racines en raison du manque d'oxygène nécessaire à une respiration normale [104].

Cette application excessive d'eau à n'importe quel stade de la croissance entraîne le lessivage du nitrate-azote sous la zone racinaire, ce qui réduit la disponibilité et l'absorption de l'azote, ainsi que l'efficacité de l'utilisation des engrais [105]. Au stade de la maturité, le stress hydrique améliore la résistance des tubercules à la perte d'eau après la récolte [104], mais il

semble que le déficit de 68% soit plus élevé avec le sol sablonneux, ce qui peut affecter le pourcentage de matière sèche du tubercule pour atteindre son maximum, et donc diminuer le rendement.

V.2.2. Le Rendement des cultures

Des mesures de rendement précises sont essentielles pour l'évaluation de la productivité des cultures et, à son tour, pour l'évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE). Nous décrivons le processus de récolte, de transport et de pesée des cultures, en soulignant les variations dans les techniques appliquées aux différentes cultures.

Le blé et l'orge, étant des céréales, ont été récoltés à l'aide de méthodes mécanisées. Des moissonneuses-batteuses et d'autres machines de récolte étaient utilisées pour collecter efficacement et uniformément les grains dans les champs. L'utilisation de machines pour la récolte des céréales a permis des mesures de rendement standardisées et précises, garantissant la fiabilité des données collectées.

Contrairement aux céréales, les cultures telles que les pommes de terre, les oignons, l'ail et les arachides nécessitent des techniques de récolte manuelle. Des ouvriers qualifiés récoltaient manuellement ces cultures, les extrayant soigneusement du sol et les rassemblant pour les mesurer. Le recours au travail manuel pour ces cultures était essentiel pour éviter les dommages et maintenir la qualité des récoltes, bien qu'il s'agisse d'un travail plus intensif.

Après la récolte, toutes les cultures, quelle que soit la méthode de récolte, étaient transportées jusqu'à un pont-bascule pour être mesurées avec précision. Le pont-bascule, généralement situé à proximité des exploitations ou dans la zone d'étude, fournissait des relevés de poids précis pour les cultures récoltées. Les agriculteurs et les travailleurs enregistraient soigneusement les relevés de poids, garantissant ainsi l'exactitude des mesures de rendement.

Le Tableau V.4 illustre la date et la méthode de récolte et le produit totale de chaque culture en tonnes.

Tableau V.4. Produit total des cultures étudiées

Pivot	Date de récolte	Méthode de récolte	Produit total (tonnes)
1 (blé d'hiver)	20 mai 2020	Mécanisée	88.56
2 (orge)	15 mai 2020	Mécanisée	98.4
3 (pomme de terre)	15 à 19 décembre 2020	Manuelle	43.8
4 (oignon)	10 à 16 mai 2020	Manuelle	75
5 (ail)	15 à 25 avril 2020	Manuelle	13.56
6 (arachide)	23 à 25 Août 2020	Manuelle	4.92

Les données précises recueillies sur les rendements ont servi de base à l'analyse ultérieure de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE) pour chaque culture. Ces données fournissent des informations précieuses sur l'efficacité des pratiques d'irrigation et la performance des cultures, comme indiqué dans la section suivante.

V.3. Évaluation de l'Efficacité Énergétique

Nous avons choisi l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'efficacité de l'utilisation de l'énergie comme critères d'évaluation de chaque pratique de gestion et de quantification des données recueillies lors des essais sur le terrain. L'efficacité de l'utilisation de l'eau permet d'évaluer la performance d'une pratique de gestion, tandis que l'efficacité de l'utilisation de l'énergie est généralement associée à l'utilisation de l'eau. Étant donné que les systèmes d'irrigation évalués dépendent actuellement de l'énergie fournie par le réseau, notre analyse englobe l'efficacité énergétique. Cependant, nous aspirons à remplacer cette source d'énergie conventionnelle par des alternatives durables et respectueuses de l'environnement, telles que l'énergie solaire photovoltaïque. Il est important de reconnaître que l'application de l'énergie solaire peut avoir des limites et des considérations spécifiques.

V.3.1. Analyse des besoins énergétiques

La puissance et l'énergie requises par une pompe pour transférer l'eau d'une source au champ sont considérablement plus importantes que l'énergie requise pour alimenter un système à pivot central lors de son déplacement à travers le champ. L'énergie utilisée par la pompe et le système d'entraînement du pivot a été déterminée à partir d'informations sur la consommation moyenne d'énergie de chaque irrigation (Tableau V.5) et en l'intégrant au temps nécessaire

pour irriguer la terre cultivée sous pivot durant toute la saison agricole de chaque culture (Tableaux V.6 et V.7).

Tableau V.5. Puissances mesurées des systèmes d'irrigation

Pivot	1	2	3	4	5	6
Puissance mesurée (KWh)	47.475	41.725	6.194	6.479	5.287	5.340

Les valeurs du Tableau V.5 représentent la moyenne de 4 mesures de la puissance requise pour chaque système d'irrigation. Ces valeurs représentent la consommation électrique horaire moyenne du moteur de la pompe, des moteurs d'entraînement et du système de contrôle. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de l'analyseur d'énergie électrique du réseau triphasé CHAUVIN ARNOUX (C. A.8332B) au début de chaque semaine du premier mois pour chaque culture. La marge de différence entre les mesures dans le cas des deux pivots modernes 1 et 2 était de 1,5 % et dans les pivots artisanaux 3, 4, 5, et 6 était de 2,5 %, et ceci par rapport aux valeurs mentionnées dans le Tableau V.3.

Tableau V.6 . Besoins énergétiques totaux saisonniers des pivots modernes

Mois	Pivot 1			Pivot 2		
	Régulations de minuterie (%)	Temps d'irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivots (KWh)	Régulations de minuterie (%)	Temps d'irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivots (KWh)
Oct.	/	/	/	100	720	30042
Nov.	100	720	34182	80	162.5	6780.3
Déc.	80	150	7121.3	80	162.5	6780.3
Jan.	80	165	7833.4	80	178.7	7456.2
Fév.	70	154	7311.1	70	167.3	6972.2
Mar.	70	171	8118.2	70	185.7	7748.4
Avr.	50	720	34182	50	720	30042
Mai	50	120	5697	/	/	/
Totaux saisonniers			104445			93086.4

L'énergie de pompage et d'entraînement saisonnière totale requise par le pivot moderne était de 104.445 MWh et de 93.08 MWh pour les deux pivots 1 et 2, respectivement. Dans le

cas des mini pivots cette énergie était de 4589, 7819, 4784 et 4175 KWh pour les pivots 3, 4, 5 et 6, respectivement.

Tableau V.7. Besoins énergétiques totaux saisonniers des mini pivots (artisansaux)

Mois	Pivot 3		Pivot 4		Pivot 5		Pivot 6	
	Temps d' irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivot (KWh)	Temps d' irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivot (KWh)	Temps d' irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivot (KWh)	Temps d' irrigation (h)	Besoins en énergie de pompe et pivot (KWh)
Jan.	/	/	134	868	54.5	288	/	/
Fév.	/	/	157	1017	272.5	1441	/	/
Mar.	/	/	244	1581	182	962	/	/
Avr.	/	/	336	2177	/	/	/	/
Mai	/	/	168	1088	/	/	204	1089
Juin	/	/	/	/	/	/	306	1634
Juillet	/	/	/	/	/	/	204	1089
Août	96.8	600	/	/	/	/	68	363
Sep.	252.6	1565	/	/	123.5	653		/
Oct.	252.6	1565	/	/	109	576		/
Nov.	138.9	861	97	628	109	576		/
Déc.			71	460	54.5	288		/
Totaux saisonniers		4589		7819		4784		4175

Ces valeurs significatives de la consommation d'énergie dans les systèmes d'irrigation étudiés, dont la cause directe est l'irrigation excessive dans le cadre de la stratégie d'irrigation traditionnelle des agriculteurs, auront un impact sur l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

L'efficacité de l'utilisation de l'énergie électrique de chaque système d'irrigation a été déterminée à l'aide des indicateurs énergétique en quantifiant l'énergie saisonnière totale requise par les systèmes d'entraînement et de pompage pour la surface totale produite.

Le Tableau V.8 illustre les caractéristiques des pivots modernes et artisansaux testés où nous remarquons que chaque deux pivots successifs ne diffèrent que par le temps par tour et le

débit de la pompe. Pour les pivots modernes 1 et 2, chacun a un forage indépendant, mais les tuyaux d'aspiration ont le même diamètre. Les deux mini pivots (3 et 4) ont le même puits, de même que les deux pivots (5 et 6). La différence de puissance mesurée dans le Tableau V.8 pour chaque paire de pivots mentionnée ci-dessus est due à la variation des valeurs de perte de charge entre chaque système, c'est-à-dire la perte d'énergie de l'eau par frottement avec les parois du tuyau, augmente avec le débit volumétrique dans un diamètre de tuyau constant. Les indicateurs énergétiques et la puissance rapportée sont présentés dans le Tableau V.9.

Tableau V.8 Caractéristiques des systèmes de pivot central étudiés

Pivot	Longueur totale (m)	Temps par rotation (h)	Nombre de travée	Débit (m ³ /h)	Surface irriguée (ha)	Puissance du moteur de la pompe (KW)	Puissance du motoréducteur (KW)
1	321	12	6	164.5	32.8	37	0.74
2	321	13	6	157.5	32.8	37	0.74
3	60	4	1	19	1.2	5.5	0.74
4	60	3.5	1	21.5	1.2	5.5	0.74
5	60	3.6	1	22	1.2	4.47	0.74
6	60	3.5	1	23.5	1.2	4.47	0.74

Si l'on considère la puissance spécifique installée, les pivots modernes 1 et 2 ont été les équipements les plus efficaces avec 1.1 kW/ha pour chacun d'entre eux ; et les mini- pivots 3 et 4 avec 4.58 kW/ha pour chacun d'entre eux, ont présenté la puissance spécifique la plus élevée, suivis par les mini-pivots 5 et 6 avec 3.72 kW/ha (Tableau V.9). Selon Rodríguez Diaz et al. [90], une puissance moyenne de 2 kW par hectare était nécessaire pour un projet d'irrigation sous pression modernisé, on peut donc dire que dans les pivots modernes, cette valeur était proche de la moitié (1.1), mais dans les pivots artisanaux, elle était 2.29 et 1.86 fois supérieure à cette valeur (4.58 ; 3.72), c'est-à-dire avec une moyenne de 4.15 kW/ha (deux fois plus). Cette puissance (kW/ha) élevée installée dans les installations de pompage des mini-pivots indique que d'importantes économies d'énergie pourraient être réalisées si la structure hydraulique de ces systèmes d'irrigation était améliorée par une analyse particulière.

Tableau V.9 Indicateurs d'efficacité énergétique

Pivot	Culture	Efficacité énergétique électrique
-------	---------	-----------------------------------

		Puissance spécifique installée (kW/ha)	Puissance mesurée (KWh)	KWh/m ³	KWh/t	KWh/ha
1	Blé	1.1	47.475	0.288	1146	3094
2	Orge	1.1	41.725	0.265	946	2838
3	Pomme de terre	4.58	6.194	0.326	115	3633.7
4	Oignon	4.58	6.479	0.301	96	6009.6
5	Aile	3.72	5.287	0.240	349.5	3949.4
6	Arachide	3.72	5.340	0.227	873.72	3582.25
Moy.		4.15	/	0.274	/	3851

Les données de consommation spécifique (E_s) des unités de pompage à pivot modernes étudiées atteignent 0.288 et 0.265 kWh/m³ d'eau consommée pour les pivots 1 et 2 respectivement, et entre 0.326 et 0.227 kWh/m³ dans le cas des mini-pivots (Tableau V.9) [98]. En se référant à l'évaluation initiale et au (Tableau V.9), on constate une relation directe entre la puissance spécifique installée et la consommation spécifique (E_s) dans le cas des pivots modernes (1 ; 2) et des mini-pivots (3 ;4). En d'autres termes, la plus faible puissance spécifique installée (kW/ha) correspond à la plus faible consommation spécifique E_s (kWh/m³). Dans le cas des deux autres mini-pivots (5 ;6), la relation était inverse, ce qui peut être dû à la faible hauteur de charge manométrique totale du système et à la valeur élevée de l'efficacité énergétique du groupe motopompe utilisé [90].

D'autre part, ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus par López et al. [4], d'une manière proche de ceux obtenus par López et Mujica [106] et égaux ou inférieurs à ceux obtenus par Granier and Deumier [18]. On peut en déduire que les valeurs de cet indicateur dans ces systèmes d'irrigation, qui est le plus important, se situent dans des limites raisonnables. Seule la consommation excessive d'eau entraînera une augmentation des valeurs des deux autres indicateurs (Tableau V.9). De plus, selon la classification proposée par Rodríguez Díaz et al. [90], la moyenne de cet indicateur (0.274 kWh/m³) implique une activité d'irrigation à faible consommation. La comparaison de l'indicateur d'efficacité énergétique obtenu dans les systèmes à pivot central avec ceux trouvés dans des études précédentes où les résultats étaient similaires a pour but d'évaluer ces dispositifs en fonction de leur consommation énergétique, ainsi que de mettre les agriculteurs dans une meilleure position pour comprendre ces dispositifs en termes de performance des systèmes.

Les deux autres indicateurs caractérisant la production d'énergie sont la consommation d'énergie par tonne produite (kWh/t) et la consommation d'énergie par unité de surface (kWh/ha) [106]. Les deux indicateurs présentent des valeurs plus élevées dans les deux cultures céréalières, ce qui est dû à la sur-irrigation et aux faibles rendements de ces deux cultures. Dans les autres cultures, le premier indicateur (kWh/t) a des valeurs raisonnables en raison de leurs bons rendements et le second indicateur (kWh/ha) a des valeurs plus élevées en raison de la sur-irrigation. Par exemple, l'oignon avait la valeur la plus faible du premier indicateur (96 kWh/t) en raison de son rendement élevé et la valeur la plus élevée du second indicateur (6009.6 kWh /ha) en raison d'une consommation d'eau excessive, qui représentait plus du double de l'eau nécessaire [98], comme le montre la Figure V.3.

V.3.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau

Les valeurs de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE) des cultures cultivées sous les six pivots sont indiquées dans (Tableau V.10). En raison de la réponse plus faible du rendement et de l'application plus importante d'eau d'irrigation, une faible IWUE a été obtenue dans le cas des cultures céréalières, avec 0.25 kg/m³ d'eau pour le blé et 0.28 kg/m³ pour l'orge [98]. On peut noter que la forte baisse des rendements du blé et de l'orge est due à une sur-irrigation dans la phase initiale, qui peut provoquer une baisse des niveaux de fertilité du sol, en particulier la lixiviation des nitrates qui peuvent facilement être perdus, notamment sur les sols sableux à faible capacité de rétention d'eau [107], sachant que les responsables de la gestion des champs appliquent des quantités spécifiques de nutriments au cours de la saison.

Tableau V.10 Eau d'irrigation, rendement et efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures [98]

Pivot	Culture	Rendement (kg/ha)	Irrigation (m ³ /ha)	IWUE (kg/m ³)
1	Blé	2700	10717	0.25
2	Orge	3000	10706	0.28
3	Pomme de terre	36 500	11146	3.27
4	Oignon	62500	19936	3.13
5	Aile	11300	16600	0.68
6	Arachide	4100	15335	0.27

Malgré les bons rendements des autres cultures (selon les agriculteurs), l'IWUE reste faible en raison des grandes quantités d'eau appliquées, qui est de 3.27, 3.13, 0.68 et 0.27 kg/m³ pour la pomme de terre, l'oignon, l'ail et l'arachide, respectivement [98]. Contrairement à

l'apport élevé en eau, ces cultures ont conservé un bon rendement, probablement parce que les agriculteurs de la zone B utilisent fréquemment la fertilisation foliaire et granulaire pendant la saison de croissance de chaque culture pour obtenir une production précoce en raison des fluctuations des prix du marché local.

V.4. Dimensionnement de pivot solaire

Si nous conservons les pivots centraux actuels, le dimensionnement approprié des systèmes PV sera basé sur la consommation d'énergie mesurée. Il est faisable et suffisant dans le présent travail de se limiter au dimensionnement du système photovoltaïque pour l'irrigation du blé avec le pivot moderne 1 (ANABIB) et pour l'irrigation des pommes de terre avec le mini pivot 3 (artisanal). De cette manière, nous avons pris en compte les deux types de dispositifs d'irrigation par pivot central, c'est-à-dire les systèmes modernes et artisanaux. Dans le présent calcul, le dimensionnement sera suivant deux scénarios, nous retiendrons la puissance consommée enregistrée dans les essais de terrain, tandis que les besoins en eau seront : (1) la quantité d'irrigation actuelle, (2) conformes aux valeurs simulées par le programme CROPWAT.

Il existe une grande variété d'outils pour le dimensionnement, l'analyse et l'optimisation des systèmes PV. Dans cette étude, les simulations sont effectuées à l'aide de PVsyst 7.2.8 pour simuler les performances des systèmes PV pour chaque site, en utilisant l'orientation sud, qui donne les meilleurs résultats dans l'irradiation globale inclinée sur les deux sites.

Les simulations effectuées à l'aide de PVsyst ont été exécutées dans des conditions dépourvues de toute influence d'ombrage et la structure déposée est un plan incliné fixe d'inclinaison 30 et d'orientation azimutale 0 pour les deux sites A et B. L'optimisation est faite pour toute l'année en respectant la perte optimale de zéro pour cent et le collecteur d'énergie sur le plan est de 2116 et 1981 kWh/m² respectivement pour les deux sites A et B comme le montre les Figures V.4 et V.5. Cette description est respectée pour tous les cas de la simulation.

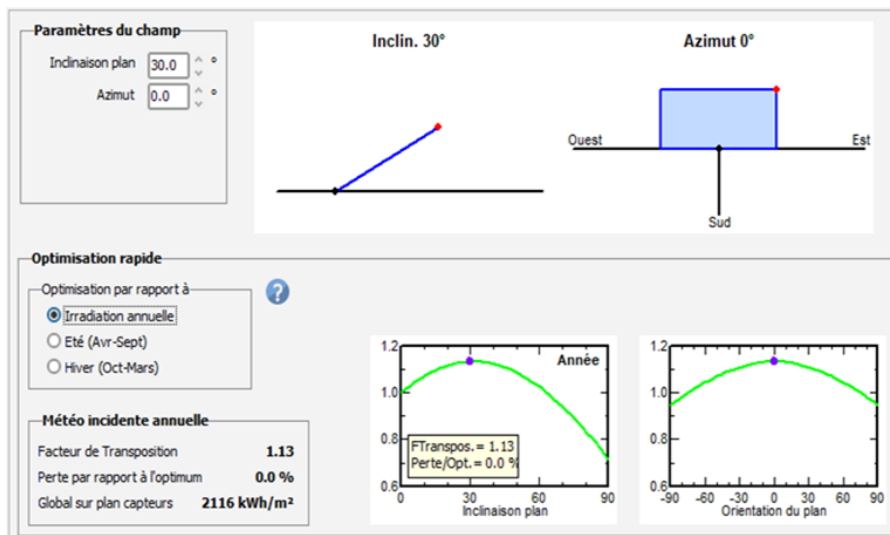


Figure V.4 Orientation et angle d'inclinaison du module PV sur le site A

Dans notre étude, à partir des listes prédéfinies dans le logiciel nous avons choisi pour toutes les cas de simulation un module PV 400Wp Si-Mono (RSM-144-6-400-M) et pour les tous les système autonome une batterie Pb-acide, scellée, Gel (AG12V200Ah). Pour le pompage solaire hybride, deux types d'onduleurs ont été sélectionnés, le premier est de 7.67 kW à partir d'une liste prédéfinie dans le logiciel et le deuxième est introduit dans la base de données du logiciel PVsyst avec une puissance nominale de 45 kW. Les paramètres électriques de ces composants sont indiqués dans l'Annexe F.

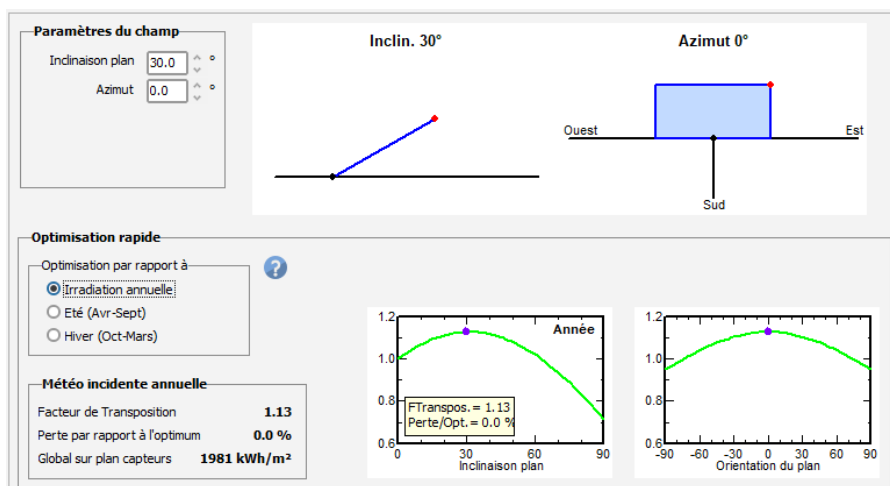


Figure V.5 Orientation et angle d'inclinaison du module PV sur le site B

La Figure V.6 montre un organigramme des différents cas de simulation qui ont été réalisés à l'aide du logiciel PVsyst des systèmes PV pour les deux pivots étudiés.

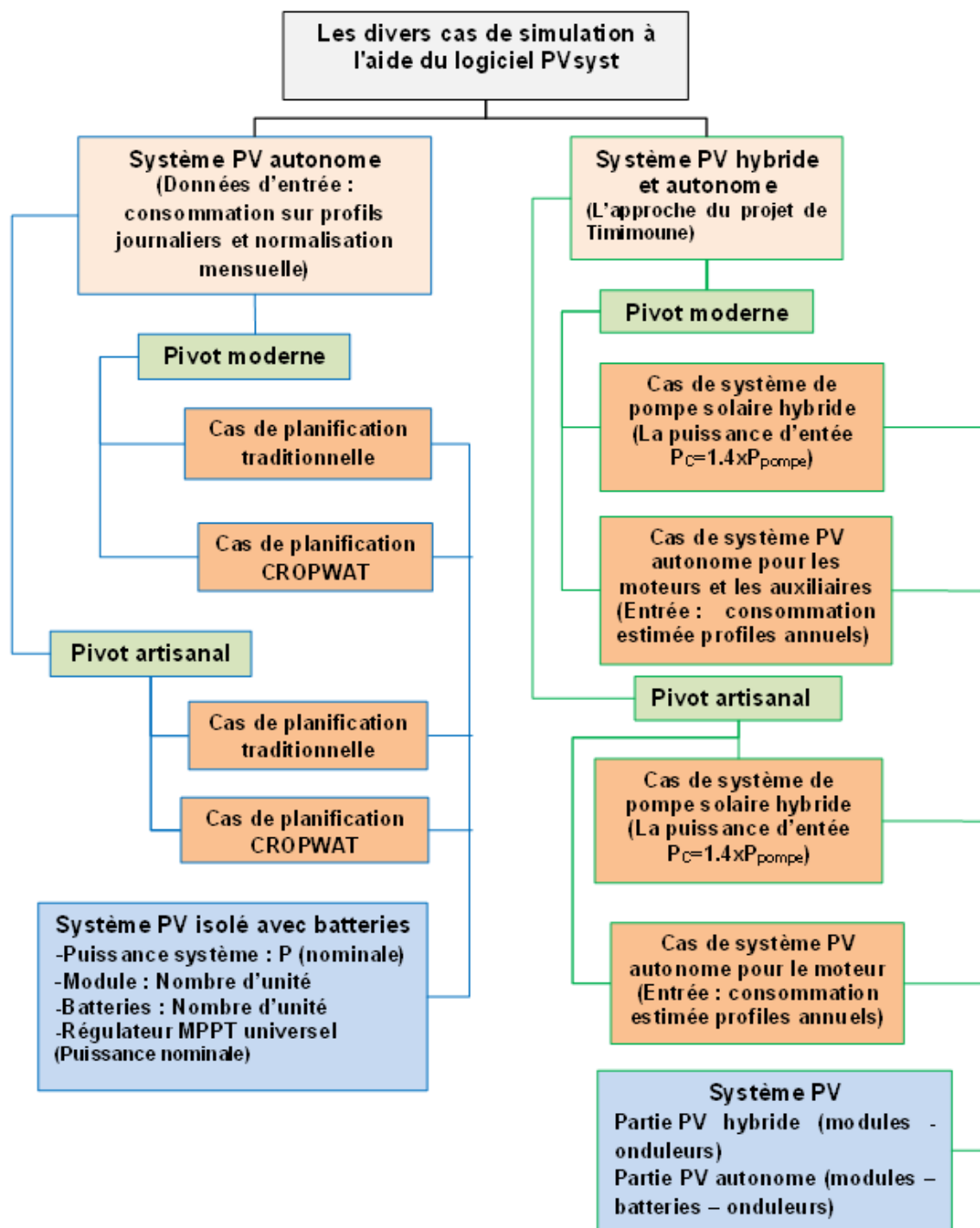


Figure V.6 Organigramme de différents cas de simulation

V.4.1. Dimensionnement des stations PV autonome

Les principaux résultats de la simulation des stations PV autonomes pour les deux pivots moderne et artisanal sont présentés dans l'Annexe F. Ici le Tableau V.11 donne le résumé de la simulation.

Tableau V.11 Résumé du résultat de la simulation des stations PV autonomes

Pivot	Moderne		Pivot artisanal	
Planification d'irrigation	Planification Traditionnelle	Planification CROPWAT	Planification Traditionnelle	Planification CROPWAT
Nombre de modules et puissance	458 x 400w	240 x 400w	24 x 400w	10 x 400w
Nombre de batteries et capacité	540 x (12V, 200Ah)	292 x (12V, 200Ah)	24 x (12V, 200Ah)	12 x (12V, 200Ah)

Les résultats de dimensionnement obtenus pour les systèmes PV solaires adaptés à chaque type de système d'irrigation à pivot, révèlent des disparités notables dans les exigences du système et les implications pour la mise en œuvre pratique.

Dans le cas du pivot d'irrigation moderne, le dimensionnement indique une différence substantielle entre les approches de programmation traditionnelle et CROPWAT. Avec la programmation traditionnelle, la taille du système solaire photovoltaïque est calculée à 183 KWc, ce qui est nettement plus important que la taille de 96 KWc déterminée avec la programmation CROPWAT (Figure V.7). Cette divergence suggère que la programmation traditionnelle conduit à une surestimation de la demande énergétique pour le système d'irrigation à pivot moderne, ce qui peut entraîner des coûts d'investissement inutiles et des complexités opérationnelles. Inversement, l'utilisation de la programmation CROPWAT permet d'obtenir un système photovoltaïque solaire de taille plus modeste, reflétant une évaluation plus précise des besoins énergétiques adaptés aux besoins en eau spécifiques des cultures et aux facteurs environnementaux.

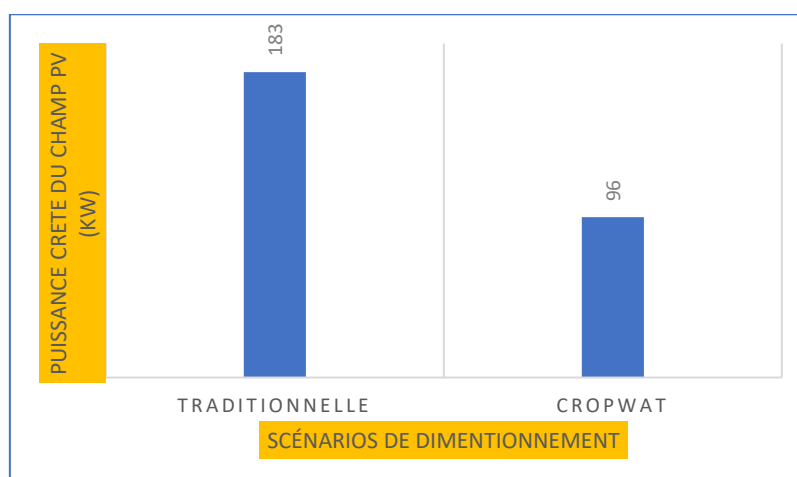


Figure V.7 Puissance crête du station PV autonome pour le pivot moderne

De même, pour le mini pivot artisanal, les résultats du dimensionnement soulignent l'impact de la méthode de programmation sur les exigences du système photovoltaïque solaire. L'approche traditionnelle de programmation de l'irrigation donne une taille de système solaire photovoltaïque de 9,6 KWc, alors que l'adoption de la programmation CROPWAT donne une taille de système réduite à 5.6 KWc (Figure V.8). Cette disparité met en évidence l'efficacité de la programmation CROPWAT dans l'optimisation de l'utilisation de l'énergie et le dimensionnement des systèmes photovoltaïques solaires en fonction des besoins et des caractéristiques spécifiques des pratiques d'irrigation traditionnelle.

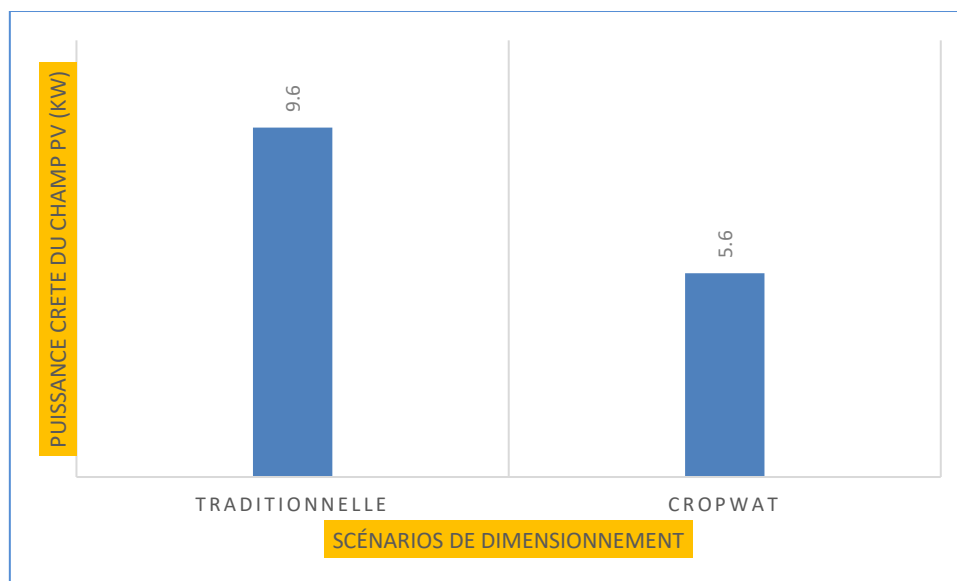


Figure V.8 Puissance crête du station PV autonome pour le mini pivot artisanal

V.4.2. Dimensionnement des stations PV mixtes, hybride et autonome

Dans la recherche de solutions durables et rentables pour alimenter les systèmes d'irrigation à pivot central dans des zones reculées, l'exploration des systèmes hybrides (station PV plus générateur diesel de secours) présente une alternative convaincante aux systèmes photovoltaïques autonome. Alors que les systèmes photovoltaïques autonomes ont traditionnellement été utilisés pour répondre aux besoins énergétiques de l'irrigation, leurs coûts initiaux, principalement liés aux exigences de stockage des batteries, posent des considérations financières importantes et prolongent la période de retour sur investissement. Afin d'appliquer l'expérience réussie de la proche du projet de Timimoun aux deux zones d'étude nous avons suivi le même chemin, où la station PV appropriée pour chaque pivot est composée de deux parties, hybride et autonome. Hybride pour la pompe et autonome pour les moteurs du pivot et les autres accessoires.

L'approche utilisée pour simuler les systèmes photovoltaïques adaptés aux deux systèmes d'irrigation à pivot étudiés est fondée sur cette méthodologie simple mais efficace, nous visons à fournir un cadre pratique pour la conception de systèmes photovoltaïques qui soit accessible aux praticiens et aux chercheurs. L'utilisation de lignes directrices établies, telles que le rapport entre la taille du champ PV et la puissance de la pompe, sert de base à cette approche, assurant son alignement sur les normes de l'industrie de l'agriculture. Pour ce faire le logiciel puissant PVsyst a été utilisé.

La partie de la station photovoltaïque affectée à la pompe a été simulée dans le programme PVsyst sous le choix connecté au réseau, afin d'obtenir l'énergie PV produite et les composants de la station (modules et onduleurs), sachant que le réseau sera remplacé par un générateur de secours (projet de Timimoune). La puissance crête de cette partie a été calculé suivant le rapport 1.4 entre la puissance nominale de la pompe et le système PV approprié, ce facteur tient en compte de toute réduction potentielle de la puissance due aux facteurs environnementaux (température, poussière, âge, etc.) Tableau V.12.

Tableau V.12 Puissance des pompes installées et leurs puissances crêtes équivalentes des stations PV

Pivot moderne ANABIB		Mini pivot artisanal	
Puissance de la pompe (kW)	Puissance à installer (kWc)	Puissance de la pompe (kW)	Puissance à installer (kWc)
37	51.2	5.5	8

La deuxième partie est affecté aux moteurs de traction du pivot plus un climatiseur et Moteur de mélange + pompe d'injection des produit chimiques et fertigation dans le cas du pivot moderne, et seulement le moteur de traction pour le mini pivot artisanal (Tableau V.13). Dans ce cas le choix sur PVsyst est le système PV autonome. Le dimensionnement a été basé sur le fait que ces composants fonctionnent environ 10 heures durant le jour tout au long de l'année.

Tableau V.13 Base de conception des stations PV autonomes

Pivot moderne ANABIB		Mini pivot artisanal	
Base de conception	Consommation estimée (kWh)	Base de conception	Consommation estimée (kWh)
Moteurs 6x 0.74 kW = 4,5kW, Moteur +pompe = 5kW, Climatiseur de 2 kW, 220V	13	Moteur 0.74 kW	1

V.4.2.1. Dimensionnement de la station solaire PV pour le pivot moderne (ANABIB)

Le résumé des sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) pour le pivot moderne est présenté dans le Tableau V.14.

Tableau V.14 Sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) : Cas de Pivot moderne

Choix de simulation	Puissance nominale (STC)	Nombre de modules	Nombre de chaînes	Onduleurs	Nombre de batteries
Connecté au réseau	51.2 kWc	128 x 400w	8 (8 x 16)	1 x 45 kWac	/
Autonome	27.2 kWc	68 x 400w	34 (34 x 2)	Régulateur universelle*	84

(*) : PVsyst lance la simulation sur le choix d'un régulateur universelle et après le choix de l'onduleur se fait techniquement sur les caractéristiques du système PV (puissance crête et tension).

Les principaux résultats de la simulation connecté au réseau ont permis d'évaluer trois paramètres principaux. Le premier paramètre est la quantité totale d'énergie produite par le système photovoltaïque Si-mono de 51.2 kWc sur une base annuelle, appelée énergie produite, soit 88.74 MWh/an. Le deuxième paramètre est la production spécifique annuelle par kWp installé, soit 1733 kWh/kWp/an. Le troisième paramètre est le ratio de performance moyen (PR) (est un facteur de qualité qui mesure la qualité d'une installation photovoltaïque), qui est de 82.01 % ce qui est considéré comme un montant précieux où il y a une faible variation de la valeur PR sur une base mensuelle, (Annexe F).

Le système PV n'est pas en mesure de convertir 100 % de l'énergie reçue du rayonnement solaire en raison de diverses pertes. La figure V.9 représente les pertes détaillées qui se produisent dans le système PV connecté au réseau proposé. Tout d'abord, un rayonnement d'environ 1871 kWh/m² est incident sur les panneaux solaires. Les pertes les plus importantes se produisent lors de la production électrique du réseau PV. Le module RSM-144-6-400-M a un rendement de 19.95 % au STC. Ainsi, 106.4 MWh d'électricité seront produites en un an par la station PV. Ensuite, en raison des pertes du panneau PV, des pertes de l'onduleur et des pertes de câblage, environ 88.7 d'unités d'électricité sont disponibles pour le réseau au cours d'une année.

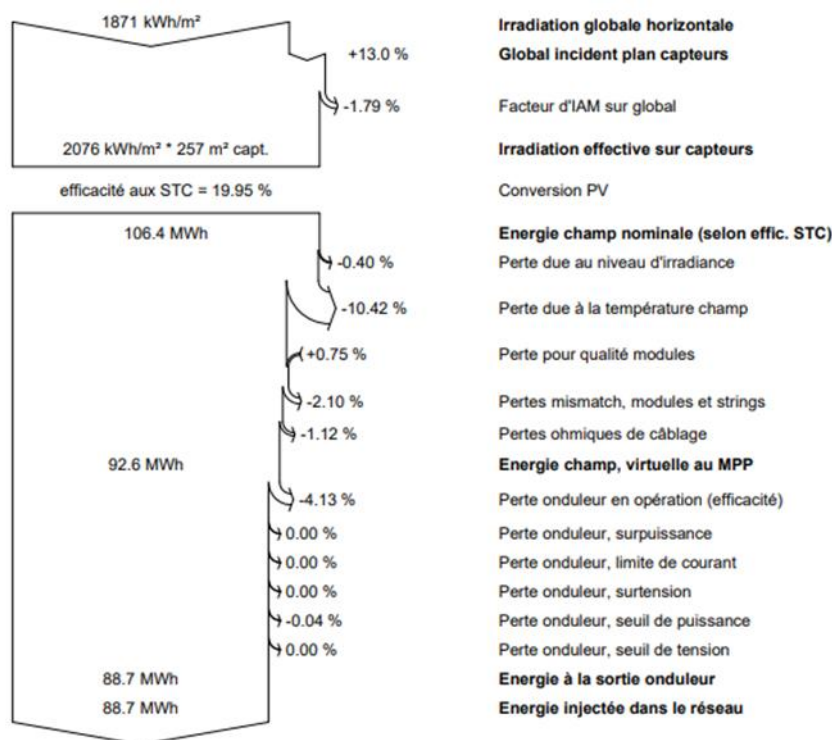


Figure V.9 Diagramme de perte détaillé pour le système photovoltaïque Si-mono de 51.2 kWc connecté au réseau

Le tableau V.15 montre une comparaison des besoins énergétiques pour les deux scénarios de planification d'irrigation, la planification traditionnelle des agriculteurs et la planification CROPWAT, pour le système d'irrigation à pivot central moderne avec l'énergie photovoltaïque disponible au réseau.

Tableau V.15 Energie produite et requise et énergie déficitaire : cas de pivot moderne

Mois	Energie PV Disponible MWh/mois	Planification traditionnelle		Planification CROPWAT	
		Energie Requise MWh/mois	Energie Manquante MWh/mois	Energie requise MWh/mois	Energie Manquante MWh/mois
Nov.	6.932	32.978	26.046	5.129	0
Déc.	6.255	7.420	1.165	4.090	0
Jan.	6.678	8.162	1.484	6.197	0
Fév.	6.389	7.217	0.828	9.711	3.322
Mars	7.651	8.015	0.364	16.370	8.719
Avr.	7.966	32.978	25.012	17.920	9.954
Mai	8.039	(*)	/	6.471	0
Ann.	49.91	96.77	54.899	65.888	21.995

(*) : Dans la programmation d'irrigation traditionnelle, il n'y a pas d'irrigation au mois de mai.

Dans le cas de planification traditionnelle, il y a des déficits énergétiques substantiels pendant toute la saison de croissance particulièrement dans le début et la fin de la saison avec 26.046 et 25.012 (MWh/mois) respectivement. Le déficit énergétique total atteint 54.899 (MWh) ce qui représente 57% du besoin énergétique total (96.77 MWh). Cependant, le scénario de planification CROPWAT montre un déficit énergétique uniquement à la mi-saison c'est-à-dire au moment du remplissage des épis du blé. Ce déficit été particulièrement dans les deux mois de mis saison mars et avril. Le déficit dans le cas de planification CROPWAT représente 33 % du besoin énergétique total.

Le scénario de planification CROPWAT démontre une approche plus optimisée et plus efficace de la programmation de l'irrigation, ce qui se traduit par une réduction des besoins en énergie tout en répondant potentiellement de manière plus efficace aux besoins en eau des cultures. La réduction de la consommation d'énergie peut contribuer à des économies de coûts et à des bénéfices environnementaux grâce à la réduction des émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'énergie.

V.4.2.2. Dimensionnement de la station solaire PV pour le mini pivot artisanal

Le résumé des sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) pour le mini pivot artisanal est présenté dans le Tableau V.16.

Tableau V.16 Sortis de la simulation (connecté au réseau et autonome) : Cas de mini Pivot artisanal

Choix de simulation	Puissance nominale (STC)	Nombre de modules	Nombre de chaînes	Onduleurs	Nombre de batteries
Connecté au réseau	8 kWc	20 x 400w	2 (2 x 10)	1 x 6.7 kWac	/
Autonome	2.4 kWc	6 x 400w	3 (3 x 2)	Régulateur universelle*	28

(*) : PVsyst lance la simulation sur le choix d'un régulateur universelle et après le choix de l'onduleur se fait techniquement sur les caractéristiques du système PV (puissance crête et tension).

Ici, aussi les principaux résultats de la simulation connecté au réseau ont permis d'évaluer les trois paramètres principaux : la quantité totale d'énergie produite par le système photovoltaïque Si-mono de 8 kWc sur une base annuelle est de 13.08 MWh/an, la production

spécifique annuelle par kWp installé, soit 1635 kWh/kWp/an et une valeur précieuse du ratio de performance moyen (PR) de 82.85 % été obtenu avec une faible variation sur une base mensuelle, (Annexe F). Également on constate que les deux derniers paramètres ont des valeurs très proches spécialement le (PR) pour les deux systèmes PV connectés au réseau 51.2 kWc et 8 kWc.

La figure V.10 représente les pertes détaillées qui se produisent dans le système PV connecté au réseau proposé. Un rayonnement d'environ 1760 kWh/m² est incident sur les panneaux solaires. Ainsi, 15.52 MWh d'électricité seront produites en un an par la station PV. Ensuite, en raison des pertes du panneau PV, des pertes de l'onduleur et des pertes de câblage, environ 13.08 d'unités d'électricité sont disponibles pour le réseau au cours d'une année.

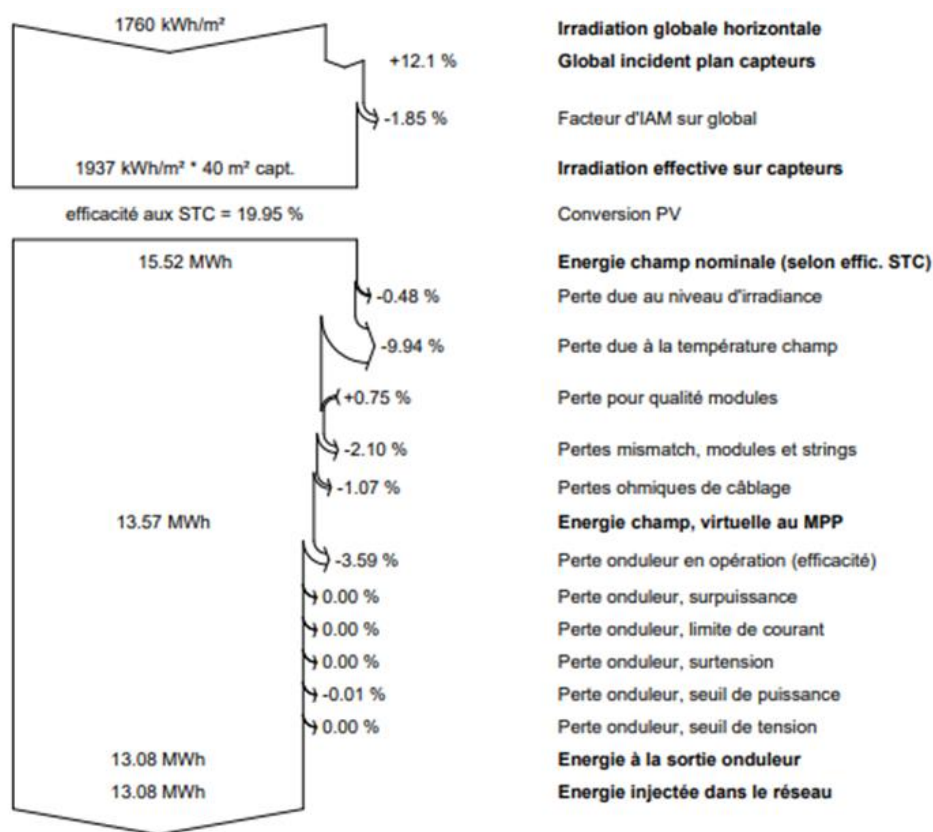


Figure V.10 Diagramme de perte détaillé pour le système photovoltaïque Si-mono de 8 kWc connecté au réseau

Le tableau V.17 montre une comparaison des besoins énergétiques pour les deux scénarios de planification d'irrigation, la planification traditionnelle des agriculteurs et la planification CROPWAT, pour le mini pivot artisanal avec l'énergie photovoltaïque disponible au réseau.

Dans le cadre du scénario de planification traditionnelle, il y a un déficit énergétique (valeurs positives) pendant les deux mois, septembre et octobre ce qui signifie que l'énergie

photovoltaïque disponible (5.326 MWh) est insuffisante pour répondre aux besoins énergétiques du système d'irrigation. Le déficit énergétique total atteint 0.925 (MWh) ce qui représente 20% du besoin énergétique total (4.591 MWh).

Cependant, dans le cadre du scénario de planification CROPWAT, l'énergie photovoltaïque disponible est suffisante pour répondre aux besoins énergétiques pendant tous les mois dans le cadre de cette planification optimisée de l'irrigation, ce qui se traduit par un déficit énergétique nul (indiqué par des valeurs 0).

Tableau V.17 Energie produite et requise et énergie déficitaire : cas de mini pivot artisanal

Mois	Energie PV Disponible MWh/mois	Planification traditionnelle		Planification CROPWAT	
		Energie Requise MWh/mois	Energie Manquante MWh/mois	Energie requise MWh/mois	Energie Manquante MWh/mois
Août	1.250	0.600	0	0.3	0
Sep.	1.138	1.565	0.427	0.556	0
Oct.	1.067	1.565	0.498	0.727	0
Nov.	0.973	0.861	0	0.483	0
Déc.	0.898	(*)	/	0.106	0
Ann.	5.326	4.591	0.925	2.172	0

(*) : Dans la programmation d'irrigation traditionnelle, il n'y a pas d'irrigation au mois de décembre.

Dans l'ensemble, Les résultats démontrent les avantages potentiels de la mise en œuvre de l'approche de planification de l'irrigation CROPWAT en conjonction avec une centrale photovoltaïque connectée au réseau. En optimisant la programmation de l'irrigation et la gestion de l'eau, la planification CROPWAT réduit considérablement la consommation d'énergie globale du système d'irrigation par rapport aux pratiques traditionnelles.

Dans l'Annexe F sont présentés les principaux résultats de ces simulations.

V.5. Implications Pratiques et Recommandations

V.5.1. Implications pour l'agriculture locale

Les résultats de cette recherche ont des implications significatives pour l'agriculture locale dans le sud de l'Algérie. En exposant les inefficacités des pratiques d'irrigation traditionnelles et en montrant le potentiel du programme CROPWAT, cette étude offre des

perspectives exploitables pour les agriculteurs, les praticiens agricoles et les décideurs politiques. L'application d'une utilisation optimisée de l'eau grâce à des méthodologies fondées sur des données peut ouvrir une nouvelle ère d'agriculture économe en ressources. Les agriculteurs locaux pourraient bénéficier de l'adoption de techniques d'irrigation de précision, éclairées par des données en temps réel et l'intégration des technologies, ce qui permettrait d'améliorer le rendement des cultures et de préserver les ressources.

V.5.2. Perspectives pour des pratiques plus durables

Les perspectives de pratiques agricoles plus durables sont prometteuses. L'intégration de systèmes d'irrigation alimentés par l'énergie solaire apparaît comme une voie viable pour relever les défis liés à l'eau et à l'énergie. La transition vers des pivots solaires pourrait non seulement réduire l'empreinte environnementale de l'irrigation, mais aussi contribuer à la durabilité à long terme. Les recommandations relatives à l'adoption des technologies solaires dans les pratiques d'irrigation pourraient ouvrir la voie à un paysage agricole plus résilient et plus respectueux de l'environnement. En outre, l'exploration de sources d'eau alternatives, telles que les eaux usées traitées, et l'investissement dans l'énergie solaire photovoltaïque pourraient faire partie d'une stratégie globale visant à atteindre les objectifs de durabilité.

En conclusion, les implications pratiques et les recommandations présentées dans cette section visent à guider les acteurs locaux vers un avenir agricole plus durable et plus efficace. L'adoption de ces idées peut conduire à des changements transformateurs, favorisant un équilibre entre une productivité accrue et une bonne gestion de l'environnement.

V.6. Conclusion

Il est primordial de réduire la consommation d'eau tout en maintenant un bon rendement (et donc un bon indice d'utilisation de l'eau). Cela conduit à améliorer l'utilisation efficace des ressources énergétiques impliquées dans la production, et pas seulement l'eau qui est l'un des principaux défis pour l'agriculture irriguée dans les années à venir. Ce chapitre présente l'évaluation de l'utilisation conjointe de l'eau et de l'énergie à travers un travail expérimental sur deux types de systèmes d'irrigation à pivot central dans le sud de l'Algérie. La différence entre la quantité d'irrigation réelle et celle calculée par le logiciel CROPWAT 8.0 a été établie pour six cultures irriguées utilisant ces pivots centraux. Les résultats indiquent qu'il y a eu une sur-irrigation dans les régions étudiées, entraînant un gaspillage d'eau et d'énergie, une faible

efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation (IWUE), et un niveau élevé des deux indicateurs d'utilisation de l'énergie (kWh/t) et (kWh/ha). En ce qui concerne la puissance spécifique installée, les pivots modernes étaient les équipements les plus efficaces avec 1,1 kW/ha pour chacun d'entre eux, alors que la moyenne des mini-pivots artisanaux était quatre fois plus élevée (4,15 kW/ha), de sorte que l'effet de cette différence est apparu directement sur l'indicateur de consommation d'énergie spécifique E_s (kWh/m³). Ces résultats sont pertinents à la fois pour les agriculteurs et les décideurs, car ils constituent une première étape vers la rationalisation de l'utilisation de l'eau et de l'énergie, suivie par l'exploration d'alternatives telles que l'utilisation d'eaux usées traitées pour soutenir les eaux souterraines disponibles, ainsi que l'investissement dans des énergies alternatives telles que l'énergie solaire photovoltaïque.

Les systèmes hybrides combinant des stations photovoltaïques (PV) et des générateurs diesel de secours offrent une solution prometteuse pour alimenter les systèmes d'irrigation à pivot central dans les zones reculées. Contrairement aux systèmes photovoltaïques autonomes, dont les coûts initiaux sont élevés en raison des exigences de stockage des batteries, les systèmes hybrides offrent une approche plus rentable, réduisant les charges financières et accélérant la période d'amortissement. En adoptant une approche similaire au projet réussi de Timimoun, en utilisant des systèmes hybrides pour les pompes et des systèmes photovoltaïques autonomes pour les moteurs et les accessoires des pivots, ces solutions peuvent être appliquées efficacement dans les deux zones d'étude.

Conclusion générale et recommandations

Les ressources en eau dans les régions arides et semi-arides, comme le sud de l'Algérie, sont confrontées à des défis croissants en raison d'un double effet : une demande croissante due à la croissance rapide de la population et à l'expansion des zones irriguées, couplée à une diminution des ressources due à des sécheresses temporaires et/ou au changement climatique. Pour assurer une gestion durable des ressources en eau, il est nécessaire de lutter contre le gaspillage et de mettre en place des observatoires régionaux des ressources en eau. Il convient de noter que les statistiques confirment les quantités excessives d'eau utilisées pour l'irrigation qui s'accompagneront d'une consommation excessive d'énergie, et qui sont principalement attribuées aux méthodes traditionnelles de programmation et de détermination de la quantité d'eau nécessaire pour une parcelle de terre.

Cette thèse porte sur l'étude du système d'irrigation à pivot central dans le but de le faire fonctionner entièrement à l'énergie solaire au lieu de l'énergie fossile traditionnelle. Ces pivots représenteront une approche moderne de l'irrigation, réduisant de manière significative les pertes d'eau. Son indépendance lui permet également d'être utilisé pour irriguer des sites isolés, ce qui représente une avancée significative dans les pratiques d'utilisation rationnelle de l'eau.

La méthodologie de travail est basée sur la collecte de données à l'aide d'analyses documentaires, d'entretiens, d'enquêtes et de mesures sur le terrain, où ont été présentés les dispositifs d'irrigation à pivot central étudiés, en mettant en valeur les cultures de valeur irriguées avec eux.

Le logiciel de simulation CROPWAT 8.0 de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'outil CLIMWAT 2.0 qui lui est associé ont été utilisés dans cette recherche pour les deux sites d'étude, pour calculer l'évapotranspiration de référence (ET₀), les besoins en eau des cultures (CWR), la programmation de l'irrigation et les besoins en eau d'irrigation.

Les résultats ont montré qu'il y avait une surconsommation d'eau suivie d'une forte consommation d'énergie électrique en raison d'une mauvaise planification de l'irrigation, qui était généralement excessive. En outre, la quantité d'eau appliquée par la planification traditionnelle de l'irrigation et celle estimée par CROPWAT ne coïncident pas pendant la plupart des stades de croissance des cultures. Un examen plus approfondi des résultats montre que l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation pour les différentes cultures était faible en

raison de la sur-irrigation. En outre, les pivots modernes présentaient l'équipement le plus efficace en termes d'indicateurs d'utilisation de l'énergie que les mini-pivots artisanaux.

Le projet de Timimoun visant à installer des stations photovoltaïques hybrides (champ PV avec générateur « diesel » de secours) pour alimenter les pivots dans le sud Algérien représente un pas de géant vers l'exploitation de l'énergie solaire verte dans le secteur agricole. Ce projet nous a servi de référence pour dimensionner des systèmes photovoltaïques hybrides adaptés aux systèmes d'irrigation à pivot central étudiés. Le même module PV utilisée dans ce projet a été choisie pour les calculs. Les résultats de la simulation étaient les suivantes : Les puissances crêtes des deux stations hybrides pour les pompes étaient de 51.2 et 8 kWc respectivement pour les pivots moderne et artisanal ; les puissances crêtes des partis autonomes des station PV pour les moteurs des pivots et accessoires étaient de 20.8 et 2.4 kWc respectivement pour les pivots moderne et artisanal.

Les résultats des travaux expérimentaux soulignent la nécessité de passer à des pratiques durables, et la conception de systèmes de pivots d'irrigation solaires s'inscrit dans cette optique.

En conclusion, la conception de systèmes de pivots d'irrigation solaires n'est pas seulement une avancée technologique, mais une voie vers une agriculture plus durable et plus efficace en termes de ressources. Cette approche, associée aux recherches en cours pour affiner les coefficients de culture et améliorer la puissance spécifique installée, peut contribuer de manière significative à l'évolution des pratiques d'irrigation dans le sud de l'Algérie, en offrant une solution résiliente aux défis auxquels est confrontée l'agriculture irriguée dans la région.

L'exploration de la dynamique de l'eau et de l'énergie dans les systèmes d'irrigation à pivot central a dévoilé des pistes essentielles pour la recherche future. Afin de faire progresser notre compréhension et de contribuer au développement durable de l'agriculture, les domaines potentiels de recherche ultérieure sont les suivants :

- ♦ Il est impératif de poursuivre les recherches afin d'affiner la précision des coefficients de culture (K_c) pour les cultures importantes d'un point de vue socio-économique dans la région.
- ♦ Il est nécessaire d'améliorer la puissance spécifique installée dans la station de pompage pour les systèmes de mini-pivots centraux.
- ♦ Études d'impact socio-économique : Explorer les implications socio-économiques plus larges de l'adoption de pratiques d'irrigation durables, en considérant les effets sur les

communautés locales, les moyens de subsistance des agriculteurs et le développement économique régional.

- ♦ Résistance au changement climatique : Étudier la résistance des systèmes d'irrigation solaire à pivot face au changement climatique, en évaluant leur adaptabilité à l'évolution des conditions météorologiques et leur rôle dans la mise en place de pratiques agricoles résistantes au climat.

Les implications de cette recherche vont au-delà du discours académique, façonnant la trajectoire du développement agricole durable dans la région. Les principales considérations sont les suivantes

- ♦ Une agriculture économe en ressources : Les résultats soulignent l'importance d'une agriculture économe en ressources. La mise en œuvre de systèmes d'irrigation solaire à pivot peut révolutionner l'utilisation de l'eau et de l'énergie, ouvrant la voie à une approche agricole plus durable et plus respectueuse de l'environnement.
- ♦ Recommandations politiques : Fournir des indications aux décideurs politiques afin qu'ils formulent et mettent en œuvre des politiques qui encouragent l'adoption de systèmes d'irrigation à énergie solaire. Il peut s'agir d'incitations, de subventions ou de cadres réglementaires qui favorisent les pratiques agricoles durables.
- ♦ Engagement communautaire : Souligner la nécessité d'un engagement communautaire et de programmes de sensibilisation pour éduquer les agriculteurs, les parties prenantes et les communautés locales sur les avantages des systèmes d'irrigation solaire à pivot. Favoriser la collaboration entre les chercheurs, les agriculteurs et les décideurs politiques afin de garantir une mise en œuvre réussie.
- ♦ L'introduction du pompage photovoltaïque dans l'irrigation à pivot central dans le sud de l'Algérie vise à augmenter la productivité des terres affectées à l'agriculture et ainsi permettre le développement économique des vastes zones rurales de cette région.

En conclusion, les efforts de recherche futurs et les implications pratiques du développement agricole durable sont étroitement liés, offrant un paysage passionnant pour l'innovation et le changement positif dans le secteur agricole du sud de l'Algérie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] D. Molden, *Water for food water for life: A Comprehensive assessment of water management in agriculture*. 2013.
- [2] M. Abidi, A. Ben Rhouma, and J. Belhadj, “Water-Energy system toward the meeting of an improved Low Voltage Ride Through Capability of Grid-Connected photovoltaic generator: power-sharing and control issues,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1841857.
- [3] A. M. De Jonge, “Eco-efficiency improvement of a crop protection product: The perspective of the crop protection industry,” *Crop Prot.*, vol. 23, no. 12, pp. 1177–1186, 2004, doi: 10.1016/j.cropro.2004.05.002.
- [4] LÓPEZ, B. E. MARTÍNEZ, D. ALCIVAR, R. S. F. HERRERA, and S.M., “Factores que incrementan el consumo energético en las máquinas de riego de pivote central,” *Rev. Ing. Agrícola*, vol. Vol. 7(4), pp. 41–46, 2017, Accessed: May 09, 2022. [Online]. Available: <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/792>.
- [5] R. G. Evans, “Center pivot irrigation,” Sidney, MT, USA, 2001.
- [6] Y. Li, X. Hui, H. Yan, and D. Chen, “Effects of travel speed and collector on evaluation of the water application uniformity of a center pivot irrigation system,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, 2020, doi: 10.3390/w12071916.
- [7] V. B. da S. Baptista, J. I. Córcoles, A. Colombo, and M. Á. Moreno, “Feasibility of the use of variable speed drives in center pivot systems installed in plots with variable topography,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 10, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/w11102192.
- [8] J. Zhang *et al.*, “Challenges and opportunities in precision irrigation decision-support systems for center pivots,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 5, 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abe436.
- [9] B. L. . CAMEJO, L. . DUARTE, J. . COMPANIONI, and W. PÉREZ, “Organización de la explotación en máquinas de pivote central eléctricas para el riego del cultivo de la papa,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 18, pp. 65–68, 2009.
- [10] W. L. Kranz, R. G. Evans, F. R. Lamm, S. A. O’Shaughnessy, and R. T. Peters, “A review of mechanical move sprinkler irrigation control and automation technologies,” *Appl. Eng. Agric.*, vol. 28, no. 3, pp. 389–397, 2012, Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=41494>.
- [11] P. H. Gowda, J. L. Chavez, P. D. Colaizzi, S. R. Evett, T. A. Howell, and J. A. Tolck,

- “ET mapping for agricultural water management: Present status and challenges,” *Irrig. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 223–237, 2008, doi: 10.1007/s00271-007-0088-6.
- [12] “File:Irrigation-caroussel-wadi-rum-jordanie-2.jpg - Wikimedia Commons.” <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Irrigation-caroussel-wadi-rum-jordanie-2.jpg> (accessed Jul. 03, 2024).
- [13] R. Allen, J. Keller, and D. Martin, *Center pivot system design2*, 2nd editio. The Irrigation Association, Falls Church, Virginia., 2011.
- [14] J. Baudet, “Le pivot.,” p. 79, 1995, Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280576504_Le_pivot.
- [15] A. Phocaides, *HANDBOOK ON PRESSURIZED IRRIGATION TECHNIQUES*, Second Edi. FAO, 2007.
- [16] E. Peyvieux, “003 Analyse du comportement mécanique & optimisation de forme d’une travée de pivot d’irrigation,” 1997, vol. thèse de d. 1997, Accessed: Jan. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/1997BOR10598>.
- [17] C. Mathieu, P. Audoye, and J. Chossat, *Bases technique de l’irrigation par aspersion*. LAVOISIER, 2007.
- [18] J. Granier and J.-M. Deumier, “Efficience hydraulique et énergétique : les nouveaux critères de performances pour les systèmes d’irrigation du futur,” *Sci. Eaux Territ.*, vol. Numéro 11, no. 2, p. 30, 2013, doi: 10.3917/set.011.0030.
- [19] D. Martin, W. Kranz, S. Irmak, C. Burr, and R. Yoder, “Center Pivot Irrigation Handbook,” 2017. Accessed: Dec. 16, 2023. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/526/>.
- [20] “Berkeley - ShopVPC.com.” <https://www.shopvpc.com/pumps/berkeley/> (accessed Jul. 09, 2024).
- [21] H. M. Salah, G. Ayoub, A. Abdelmalek, and M. Khaled, “Theoretical sprinkler-spacing configurations in center pivot irrigation system,” *Water Energy Int.*, vol. 62r, no. 9, pp. 54–59, 2019.
- [22] B. A. King, R. W. Wall, and T. F. Karsky, “Center-Pivot Irrigation System for Independent Site-Specific Management of Water and Chemical Application,” *Appl. Eng. Agric.*, vol. 25, no. 2, pp. 187–198, 2009, doi: 10.13031/2013.26334.
- [23] L. New and G. Fipps, “Center pivot irrigation,” *oaktrust.library.tamu.edu2000* ,, [Online]. Available: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/86877>.
- [24] A. Ould Rebai, T. Hartani, M. N. Chabaca, and M. Kuper, “Une innovation

- incrémentielle: la conception et la diffusion d'un pivot d'irrigation artisanal dans le Souf (Sahara algérien),” *Cah. Agric.*, vol. 26, no. 3, 2017, doi: 10.1051/cagri/2017024.
- [25] A. O. Rebai, T. Hartani, and M. Kuper, “The outward journey of a local innovation: diffusion of an artisanal irrigation pivot from the Algerian Sahara,” *New Medit*, vol. 2022, no. 5, pp. 71–84, 2022, doi: 10.30682/nm2205e.
- [26] M. Kumar and A. Kumar, “Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. April, pp. 554–587, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.083.
- [27] M. H. Shubbak, “Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109383.
- [28] P. Periasamy, N. K. Jain, and I. P. Singh, “A review on development of photovoltaic water pumping system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 918–925, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.019.
- [29] S. Philipps and W. Warmuth, “PV report - Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH,” *Fraunhofer ISE*, no. February, p. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/stud>, 2022, [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- [30] R. A. Messenger and A. Abtahi, *Photovoltaic Systems Engineering*, Fourth Edi. CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [31] M. Jamil, M. Rizwan, and D. P. Kothari, *Grid integration of solar photovoltaic systems*. CRC Press, 2017.
- [32] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. S. Sy, S. Eric, and B. S. Sy, *LE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*, Éditions M. Québec (CANADA): IEPF, Ottawa University, 1998.
- [33] L. Al Asmar, “Modelling solar radiation for (PV) optimisation,” École des Ponts ParisTech, 2021. English. NNT : 2021ENPC0034. tel-03636889, 2021.
- [34] M. SALMI, “Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques,” Thèse, Ferhat Abbas - SÉTIF, 2012.
- [35] PACER, *Centrales photovoltaïques - Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets*. DAC, 1006 Lausanne, 2013.
- [36] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,” *Elsevier*, vol. 74, pp. 590–601, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>.

- [37] A. Mohammad Bagher, M. M. A. Vahid, and M. Mohsen, “Types of Solar Cells and Application,” *Am. J. Opt. Photonics*, vol. 3, no. 5, pp. 94–113, 2015, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [38] K. V. Vidyanandan, “An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems,” *Energy Scan*, pp. 2–8, 2017, Accessed: Aug. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net>.
- [39] J. Subtil Lacerda and J. C. J. M. Van Den Bergh, “Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 331–340, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.032.
- [40] E. K. Solak and E. Irmak, “Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 18, pp. 12244–12269, 2023, doi: 10.1039/d3ra01454a.
- [41] A. Hamidat, B. Benyoucef, and T. Hartani, “Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions,” *Renew. Energy*, vol. 28, no. 7, pp. 1081–1096, 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(02)00058-7.
- [42] M. Hejri, H. Mokhtari, M. R. Azizian, and L. Söder, “An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 396–410, Apr. 2016, doi: 10.1080/14786451.2013.863886.
- [43] M. Hejri and H. Mokhtari, “On the Comprehensive Parametrization of the Photovoltaic (PV) Cells and Modules,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 1, pp. 250–258, 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2617038.
- [44] S. Karabanov, Y. Kukhmistrov, B. Miedzinski, and Z. Okraszewski, “Photovoltaic systems,” in *Proceedings - International Symposium: Modern Electric Power Systems, MEPS'10*, Jan. 2010, pp. 481–540, doi: 10.1016/b978-0-12-397270-5.00009-1.
- [45] A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, P. A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, and V. Sambou, “Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 8(21), no. 21, pp. 1166–1173, 2013, doi: 10.5897/IJPS2013.3921.
- [46] A. Hamidat and B. Benyoucef, “Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 933–942, 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.06.023.
- [47] S. A. Kalogirou, “Chapter 9 - Photovoltaic Systems,” in *Solar Energy Engineering*,

- 2009, pp. 469–519.
- [48] and H. B. Hansen, A.D., P, Sorensen., L.H. Hansen., “Models for a stand-alone PV system,” *Riso-R-1219 (EN)/ SEC-R-12. Roskilde*. 2000 ,.
- [49] S. Ghozzia and K. Mahkamovb, “Case Study: Modelling and Sizing Stand-Alone PV Systems for Powering Mobile Phone Stations in Libya,” in *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, 2011, vol. 57, pp. 2891–2898, doi: 10.3384/ecp110572891.
- [50] O. Gergaud *et al.*, “Energy Modeling of a Lead-Acid Battery Within Hybrid Wind / Photovoltaic Systems,” *Renew. Energy*, pp. 1–10, 2003, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-00674678/>.
- [51] O. Hashimoto, T. Shimizu, and G. Kimura, “A novel high performance utility interactive photovoltaic inverter system,” Nov. 2002, pp. 2255–2260, doi: 10.1109/ias.2000.883139.
- [52] S. Khenfous, A. Kaabeche, and S. Diaf, “Optimisation du dimensionnement d’un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 20, no. December, pp. 267–284, 2017.
- [53] S. Verma *et al.*, “Solar PV powered water pumping system - A review,” in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 46, pp. 5601–5606, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.434.
- [54] S. S. Chandel, M. Nagaraju Naik, and R. Chandel, “Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1084–1099, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.083.
- [55] M. Aliyu, G. Hassan, S. A. Said, M. U. Siddiqui, A. T. Alawami, and I. M. Elamin, “A review of solar-powered water pumping systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 87, pp. 61–76, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.010.
- [56] B. Parida, S. Iniyana, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [57] L. Gevorkov, J. L. Domínguez-García, and L. T. Romero, “Review on Solar Photovoltaic-Powered Pumping Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010094.
- [58] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, “Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1038–1067, 2016,

- doi: 10.1016/j.rser.2016.01.021.
- [59] H. F. Ahmed and W. Helgason, “Reliability model for designing solar-powered center-pivot irrigation systems,” *Trans. ASABE*, vol. 58, no. 4, pp. 947–958, 2015, doi: 10.13031/trans.58.10930.
- [60] V. Roy, S. S. Noureen, S. Bayne, A. Bilbao, and M. Giesselmann, “A renewable solution approach for center pivot irrigation system,” *Pap. Present. Annu. Conf. - Rural Electr. Power Conf.*, vol. 2018-May, pp. 61–66, 2018, doi: 10.1109/REPC.2018.00018.
- [61] R. H. . Herraiz, J.I.; Almeida and L. Castillo-Cagigal, M.; Narvarte, “Experimental Performance Evaluation of a PV-Powered Center-Pivot Irrigation System for a Three-Year Operation Period,” *energies*, vol. 16, no. 3654, p. 19, 2023, doi: .org/10.3390/en16093654.
- [62] M. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, “FAO Irrigation and Drainage Paper NO. 56: Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water use),” *FAO, Rome*, vol. 300, no. 9, p. 333, 1998, Accessed: Jul. 16, 2021. [Online]. Available: https://scihub.sil.org/http://www.avwatermaster.org/filingdocs/195/70653/172618e_5xAGWAx8.pdf.
- [63] L. S. Pereira, R. G. Allen, M. Smith, and D. Raes, “Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future,” *Agricultural Water Management*, vol. 147, pp. 4–20, 2015, doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
- [64] A. P. SAVVA, And, and K. FRENKEN, *Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling*. 2002.
- [65] F. Cuadros, F. López-Rodríguez, A. Marcos, and J. Coello, “A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 465–473, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.08.040.
- [66] S. H. Ewaid, S. A. Abed, and N. Al-Ansari, “Crop water requirements and irrigation schedules for some major crops in southern Iraq,” *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, 2019, doi: 10.3390/w11040756.
- [67] FAO, “CropWat | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations,” *Food and Agriculture Organization of the uNited Nation*. 2018, Accessed: Dec. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>.
- [68] M. Davis, “Food and Agriculture Organization of the United Nations,” in *Chemicals*,

- Environment, Health: A Global Management Perspective*, 2011, pp. 282–299.
- [69] A. Acakpovi, F. F. Xavier, and R. Awuah-Baffour, “Analytical method of sizing photovoltaic water pumping system,” in *Proceedings of the 2012 IEEE 4th International Conference on Adaptive Science and Technology, ICAST 2012*, 2012, pp. 65–69, doi: 10.1109/ICASTech.2012.6381067.
- [70] A. H. Arab, M. Benghanem, and A. Gharbi, “Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque,” *Rev. Energ. Ren*, vol. 8, pp. 19–26, 2005, Accessed: Oct. 17, 2022. [Online]. Available: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/cder_dimensionnement_systemes_pompage_photovoltaique.pdf.
- [71] D. H. Muhsen, T. Khatib, and H. T. Haider, “A feasibility and load sensitivity analysis of photovoltaic water pumping system with battery and diesel generator,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 148, pp. 287–304, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.007.
- [72] L. Narvarte, E. Lorenzo, and E. Caamaño, “PV pumping analytical design and characteristics of boreholes,” *Sol. Energy*, vol. 68, no. 1, pp. 49–56, 2000, doi: 10.1016/S0038-092X(99)00050-X.
- [73] Z. Glasnovic and J. Margeta, “A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 7, pp. 904–916, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.11.003.
- [74] J. Kenna and B. Gillett, *Solar water pumping: a handbook*. Printed by the Russell Press Ltd., Bertrand Russell House, Gamble Street, Nottingham NG7 4ET, 1985.
- [75] Y. W. Wong and K. Sumathy, “Solar thermal water pumping systems: a review,” *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 3, no. 2, pp. 185–217, 1999, doi: 10.1016/S1364-0321(98)00018-5.
- [76] G. Li, Y. Jin, M. W. Akram, and X. Chen, “Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79. Pergamon, pp. 440–458, Nov. 01, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.055.
- [77] F. Bandou, A. Hadj Arab, K. Bouchouicha, and N. Zerhouni, “Diagnostic de pannes d’un système de pompage photovoltaïque,” *J. Renew. Energies*, vol. 14, no. 3, 2023, doi: 10.54966/jreen.v14i3.280.
- [78] Y. Goswami, “Alternative Energy in Agriculture,” *Alternative Energy in Agriculture*, vol. II. pp. 83–102, 1986, Accessed: Oct. 21, 2022. [Online]. Available:

- <https://www.osti.gov/biblio/5189010>.
- [79] P. Campana, H. Li, J. Zhang, R. Zhang, ... J. L.-E. C. and, and U. 2015, “Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation,” *Elsevier*, vol. 95, pp. 32–41, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.01.066.
- [80] A. Mérida García, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, and J. A. Rodríguez Díaz, “Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 175, pp. 670–682, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.093.
- [81] B. Bouzidi, M. Haddadi, and O. Belmokhtar, “Assessment of a photovoltaic pumping system in the areas of the Algerian Sahara,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 879–886, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.01.013.
- [82] B. G. Belgacem, “Performance of submersible PV water pumping systems in Tunisia,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 4, pp. 415–420, 2012, doi: 10.1016/j.esd.2012.10.003.
- [83] L. C. Kelley, E. Gilbertson, A. Sheikh, S. D. Eppinger, and S. Dubowsky, “On the feasibility of solar-powered irrigation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 14: 2669–2682, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.061.
- [84] A. Mokeddem, A. Midoun, D. Kadri, S. Hiadsi, and I. A. Raja, “Performance of a directly-coupled PV water pumping system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 10, pp. 3089–3095, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.04.024.
- [85] R. López-Luque, J. Reça, and J. Martínez, “Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards,” *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 13–23, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.107.
- [86] P. C. Pande, A. K. Singh, S. Ansari, S. K. Vyas, and B. K. Dave, “Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards,” *Renew. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 385–396, 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(02)00037-X.
- [87] J. Reça, C. Torrente, R. López-Luque, and J. Martínez, “Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1143–1154, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.056.
- [88] H. F. Ahmed and W. Helgason, “Reliability model for designing solar-powered center-pivot irrigation systems,” *Trans. ASABE*, vol. 58, no. 4, pp. 947–958, 2015, doi: 10.13031/trans.58.10930.
- [89] H. F. Ahmed, “an Approach for Design and Management of a Solar-Powered Center

- Pivot Irrigation System,” 2013.
- [90] J. A. Rodríguez Díaz, E. Camacho Poyato, and M. Blanco Pérez, “Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain,” *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 137, no. 10, pp. 644–650, 2011, doi: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000338.
- [91] L. Zotarelli, J. M. Scholberg, M. D. Dukes, R. Muñoz-Carpena, and J. Icerman, “Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling,” *Agric. Water Manag.*, vol. 96, no. 1, pp. 23–34, 2009, doi: 10.1016/j.agwat.2008.06.007.
- [92] B. D. S. Barbosa, A. Colombo, J. G. N. de Souza, V. B. Victor, and A. C. S. de Araújo, “Energy efficiency of a center pivot irrigation system,” *Eng. Agric.*, vol. 38, no. 2, pp. 284–292, 2018, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p284-292/2018.
- [93] J. I. Córcoles, J. A. de Juan, J. F. Ortega, J. M. Tarjuelo, and M. A. Moreno, “Management evaluation of Water Users Associations using benchmarking techniques,” *Agricultural Water Management*, vol. 98, no. 1, pp. 1–11, 2010, doi: 10.1016/j.agwat.2010.07.018.
- [94] Z. Lakhdar, *L’irrigation par aspersion*, 2ème (2.02. 2017).
- [95] G. Blom-zandstra and J. Michielsen, “Sustainable water use in potato production in Algeria: Introduction of a subsurface fertigation system in the desert,” 2020. doi: 10.18174/530075.
- [96] N. Koull and M. T. Halilat, “Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d’ Ouargla (Algérie),” *Etude Gest. des Sols*, vol. 23, no. March 2012, pp. 9–20, 2016, Accessed: Aug. 04, 2021. [Online]. Available: https://sci-hub.si/https://www.researchgate.net/profile/Naima-Koull/publication/295351212_Effets_de_la_matiere_organique_sur_les_proprietes_physiques_et_chimiques_des_sols_sableux_de_la_region_d’Ouargla_Algerie/links/5a01643daca2725286e2f253/Effets-de-la-
- [97] C. Derek, S. Martin, and E.-A. Khaled, “CropWat for Windows : User guide,” *FAO. Roma*, no. October, p. 43, 2000, Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~jgoicochea/Manuales/CROPWAT4W.pdf>.
- [98] M. Brik, A. Guerrah, and A. Atia, “Water-energy nexus: A systematic analysis and evaluation of a center-pivot irrigation system,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 44, no. 3, pp. 8299–8313, 2022, doi: 10.1080/15567036.2022.2120929.

- [99] M. A. Moreno, D. Medina, J. F. Ortega, and J. M. Tarjuelo, “Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells,” *Agric. Water Manag.*, vol. 107, pp. 112–121, 2012, doi: 10.1016/j.agwat.2012.01.016.
- [100] J. M. Tarjuelo, J. A. Rodriguez-Diaz, R. Abadía, E. Camacho, C. Rocamora, and M. A. Moreno, “Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies,” *Agric. Water Manag.*, vol. 162, pp. 67–77, 2015, doi: 10.1016/j.agwat.2015.08.009.
- [101] V. Parkash and S. Singh, “A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 10, 2020, doi: 10.3390/SU12103945.
- [102] J. Zhang, X. Sui, B. Li, B. Su, J. Li, and D. Zhou, “An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation,” *F. Crop. Res.*, vol. 59, no. 2, pp. 91–98, 1998, doi: 10.1016/S0378-4290(98)00104-X.
- [103] H. Zhang, X. Wang, M. You, and C. Liu, “Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China plain,” *Irrig. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 37–45, 1999, doi: 10.1007/s002710050069.
- [104] B. A. King, J. C. Stark, and H. Neibling, “Potato Irrigation Management,” in *Potato Production Systems*, 2020, pp. 417–446.
- [105] J. C. Ojala, J. C. Stark, and G. E. Kleinkopf, “Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality,” *Am. Potato J.*, vol. 67, no. 1, pp. 29–43, 1990, doi: 10.1007/BF02986910.
- [106] M. López, A. Mujica, ... O. B.-R. C. T., and U. 2012, “Evaluación del consumo energético de las máquinas de pivotes centrales eléctricas en la empresa cultivos varios la Cuba provincia Ciego de Ávila,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 21, pp. 30–34, 2012, Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: <https://scihub.si/https://www.redalyc.org/pdf/932/93225180005.pdf>.
- [107] P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes, *Crop yield response to water*. 2012.

Annexes

Annexe A

Instruments de mesure

A.1 Mesure de débit

La Figure ci-dessous montre le réservoir de 1m^3 de volume et le chronomètre utilisés pour déterminer le débit de la pompe.



Figure A.1. Instruments de mesure de débit pompe

A.2 Mesure de la puissance consommée

Pour mesurer la puissance consommée des systèmes d'irrigation étudiés nous avons utilisé l'analyseur d'énergie électrique triphasée CHAUVIN ARNOUX C.A 8332B (Figure A.2). C'est un analyseur d'énergie électrique triphasée compacts et résistants aux chocs. Grâce à leur conception ergonomique et à leur interface conviviale, leur utilisation est à la fois agréable et intuitive. Ces analyseurs offrent non seulement un aperçu des principales caractéristiques d'un réseau, mais facilitent également le suivi des variations dans le temps. Le système de mesure multitâche permet d'exécuter simultanément les fonctions de détection, d'enregistrement continu et de visualisation.

Parmi les principales mesures réalisées sont :

- ✚ Mesure des tensions efficaces alternatives jusqu'à 480 V (phase-neutre) ou 960 V (phase-phase) pour les réseaux 2 fils, 3 fils ou 4 fils.

- ✚ Mesure des courants efficaces alternatifs jusqu'à 6500 A eff. Mesure de la fréquence des réseaux 50 Hz, 60 Hz (40 Hz à 70 Hz).
- ✚ Mesure des puissances actives, réactives et apparentes par phase et cumulées.
- ✚ Suivi de la valeur moyenne de n'importe quel paramètre, calculée sur une période de 1s à 2 h. Stockage des valeurs sur une durée limitée par la mémoire de l'appareil.



Figure A.2. L'analyseur d'énergie CHAUVIN ARNOUX (C. A.8332B)

Annexe B

Visites de terrain

Tableau 1. Les caractéristiques électriques des pivots testés

Propriétés			
Pivot	Puissance de la pompe (kW)	Puissance du motoréducteur (kW)	Temps de rotation (h)
01	37	0.74	(13h)
02	37	0.74	(12h)
03	37	0.74	(12h)
04	5.5	0.74	(4h00min)
05	5.5	0.74	(3h30min)
06	5.5	0.55	(3h30min)
07	5.5	0.55	(3h30min)
08	5.5	0.55	(3h30min)
09	4.75	1.1	(3h36min)
10	4.75	1.1	(3h30min)
11	4	0.55	(3h10min)
12	4	0.55	(3h05min)
13	5.5	0.75	(4h30min)
14	5.5	0.75	(4h45min)
15	3+1.5	0.75	(4h02min)
16	3+2.2	550	(3h57min)
17	4	0.55	(4h16min)
18	2.2+1.5	0.55	(3h38min)
19	4+3	0.55	(3h55min)
20	4+2.2	0.55	(4h07min)

Tableau B.2 Les caractéristiques géométriques des pivots testés

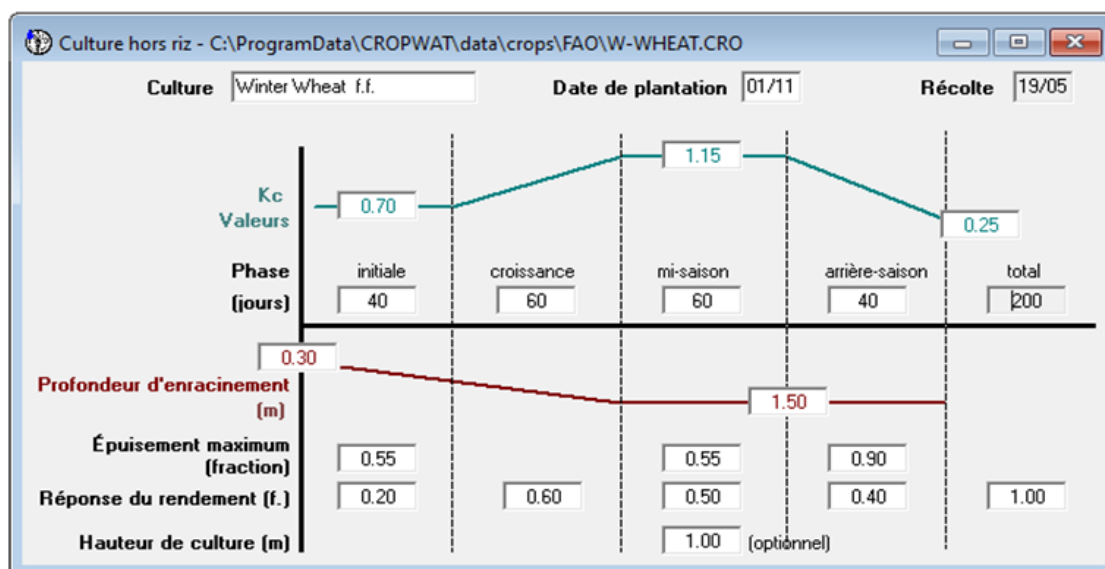
Pivot	Niveau statique du Forage (m)	Distance du pivot au forage (m)	Hauteur de la travée au sol (m)	Longueur totale du système (m)	Nombre de travées	Surface irriguée (ha)
01	170	4	4.5	312	6	32.8
02	160	3	4.5	312	6	32.8
03	150	3	4.5	312	6	32.8
04	33	70.4	1.5	48	1	0.78
05	32	100	1.45	54	1	0.98
06	23	70	1.5	60	1	1.2
07	23	75	1.55	60	1	1.2
08	23	80	1.6	60	1	1.2
09	24	80	1.8	60	1	1.2
10	26	85	1.8	60	1	1.2
11	13	100	1.6	48	1	0.78
12	13	27	1.6	48	1	0.78
13	27	90	1.5	60	1	1.2
14	/	/	1.45	65	1	1.33
15	17	70	1.6	60	1	1.2
16	18	80	1.55	48	1	0.78
17	17	61	1.5	60	1	1.2
18	15	77	1.6	60	1	1.2
19	15	89	1.6	60	1	1.2
20	17	69	1.54	48	1	0.78

Annexe C

Sorties du model CROPWAT

Besoins en eau des cultures

C.1 Cultures du site [A]

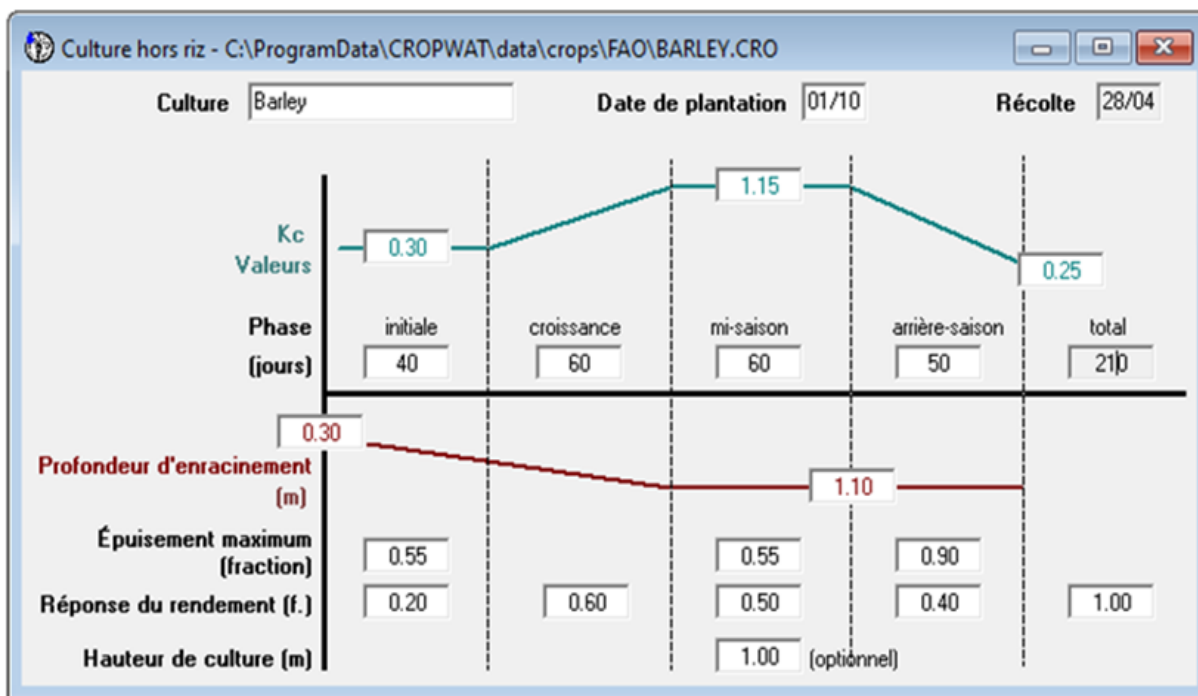


Besoins en eau des cultures

Station ET0: TOUGGOURT Culture: Winter Wheat f.f.
 Station Pluie: TOUGGOURT Date de plantation: 01/11

Mois	Décade	Phase	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
			coeff	mm/jour	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Nov	1	Init	0.70	1.67	16.7	0.0	16.7
Nov	2	Init	0.70	1.26	12.6	0.0	12.6
Nov	3	Init	0.70	1.14	11.4	0.0	11.4
Déc	1	Init	0.70	1.05	10.5	0.0	10.5
Déc	2	Crois	0.74	0.96	9.6	0.0	9.6
Déc	3	Crois	0.83	1.13	12.4	0.0	12.4
Jan	1	Crois	0.92	1.31	13.1	0.0	13.1
Jan	2	Crois	1.00	1.50	15.0	0.0	15.0
Jan	3	Crois	1.08	1.92	21.1	0.0	21.1
Fév	1	Mi-sais	1.16	2.38	23.8	0.0	23.8
Fév	2	Mi-sais	1.19	2.75	27.5	0.0	27.5
Fév	3	Mi-sais	1.19	3.22	25.8	0.0	25.8
Mar	1	Mi-sais	1.19	3.70	37.0	0.0	37.0
Mar	2	Mi-sais	1.19	4.17	41.7	0.0	41.7
Mar	3	Mi-sais	1.19	4.66	51.3	0.0	51.3
Avr	1	Arr-sais	1.18	5.14	51.4	0.0	51.4
Avr	2	Arr-sais	1.03	4.91	49.1	0.0	49.1
Avr	3	Arr-sais	0.80	4.18	41.8	0.0	41.8
Mai	1	Arr-sais	0.57	3.23	32.3	0.0	32.3
Mai	2	Arr-sais	0.34	2.12	19.1	0.0	19.1
					523.1	0.0	523.1

Figure C.1 Besoins en eau du blé



Besoins en eau des cultures

Station ET0: TOUGGOURT Culture: Barley

Station Pluie: TOUGGOURT Date de plantation: 01/10

Mois	Décade	Phase	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
			coeff	mm/jour	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	1	Init	0.30	1.25	12.5	0.0	12.5
Oct	2	Init	0.30	1.06	10.6	0.0	10.6
Oct	3	Init	0.30	0.90	9.9	0.0	9.9
Nov	1	Crois	0.30	0.72	7.2	0.0	7.2
Nov	2	Crois	0.39	0.71	7.1	0.0	7.1
Nov	3	Crois	0.54	0.88	8.8	0.0	8.8
Déc	1	Crois	0.69	1.02	10.2	0.0	10.2
Déc	2	Crois	0.83	1.07	10.7	0.0	10.7
Déc	3	Crois	0.98	1.34	14.7	0.0	14.7
Jan	1	Mi-sais	1.13	1.62	16.2	0.0	16.2
Jan	2	Mi-sais	1.17	1.76	17.6	0.0	17.6
Jan	3	Mi-sais	1.17	2.08	22.9	0.0	22.9
Fév	1	Mi-sais	1.17	2.40	24.0	0.0	24.0
Fév	2	Mi-sais	1.17	2.72	27.2	0.0	27.2
Fév	3	Mi-sais	1.17	3.18	25.5	0.0	25.5
Mar	1	Arr-sais	1.17	3.65	36.5	0.0	36.5
Mar	2	Arr-sais	1.05	3.70	37.0	0.0	37.0
Mar	3	Arr-sais	0.86	3.37	37.1	0.0	37.1
Avr	1	Arr-sais	0.67	2.89	28.9	0.0	28.9
Avr	2	Arr-sais	0.48	2.28	22.8	0.0	22.8
Avr	3	Arr-sais	0.31	1.64	13.1	0.0	13.1
					400.5	0.0	400.5

Figure C.2 Besoins en eau de l'orge

C.2 Cultures du site [B]

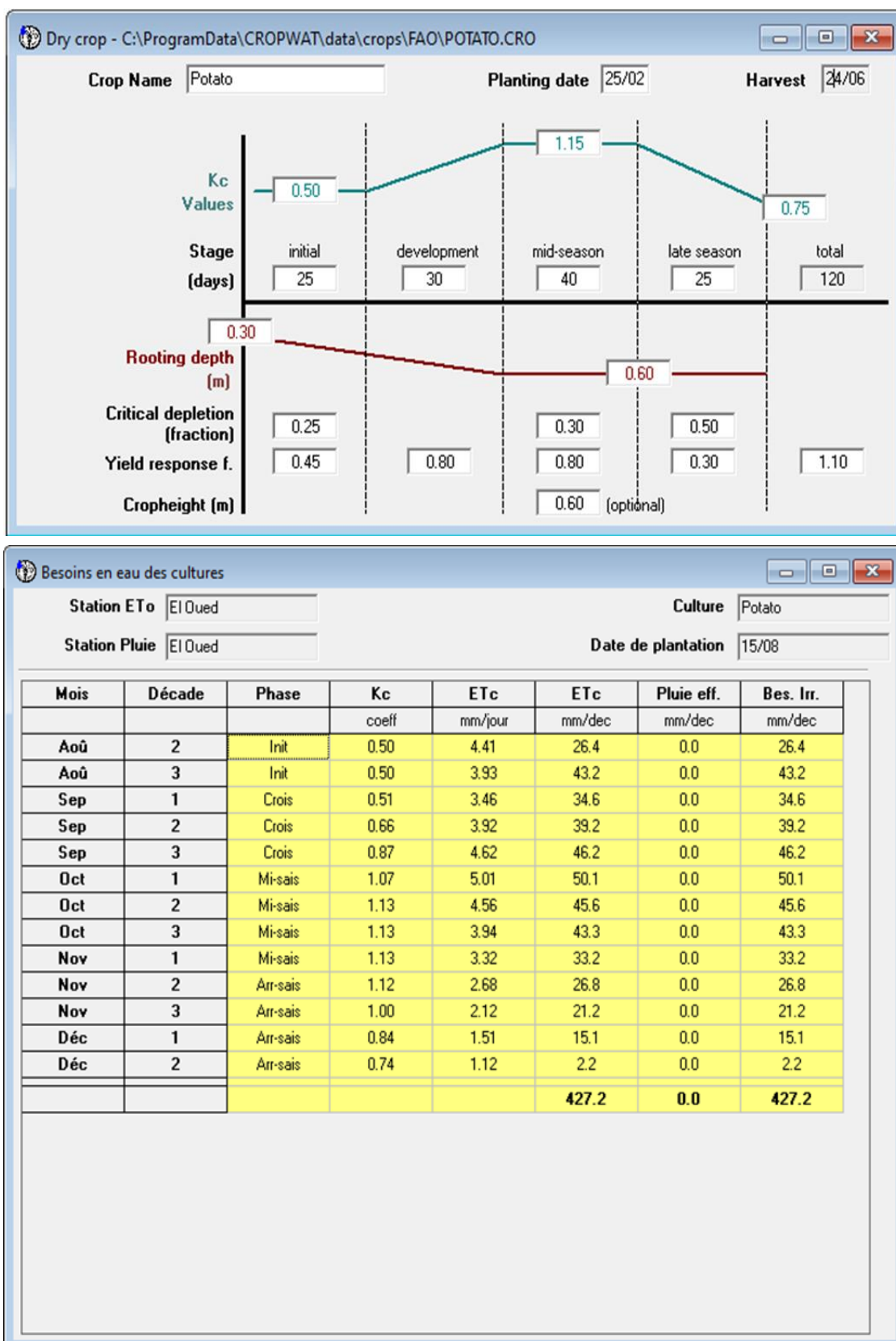
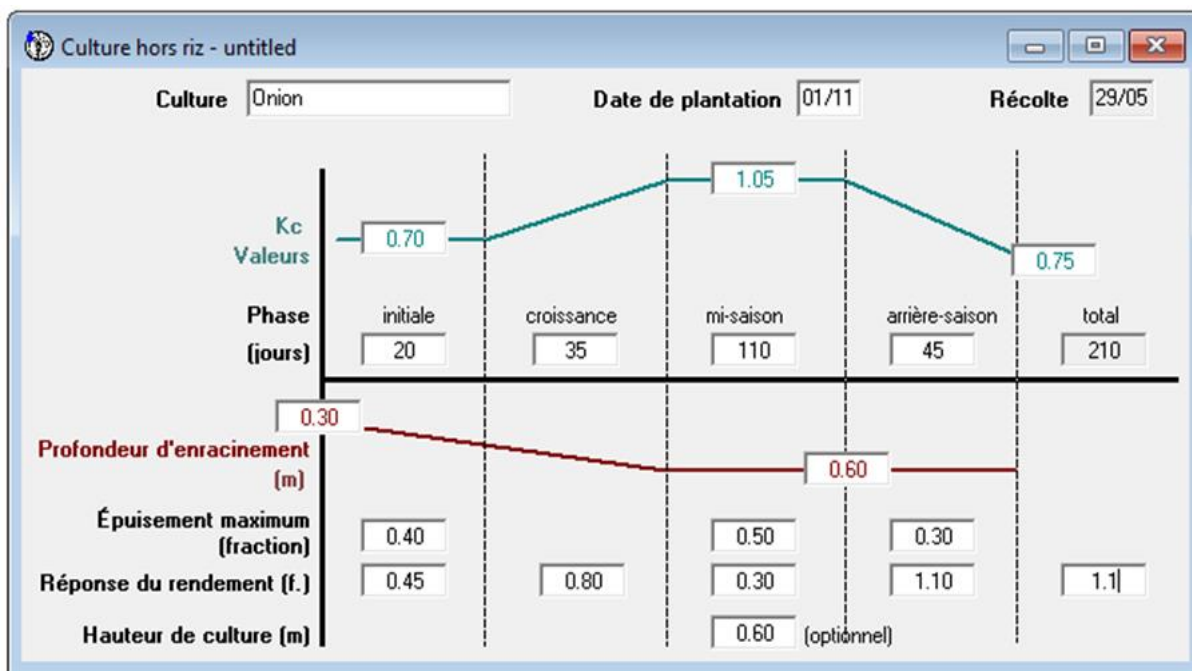


Figure C.3 Besoins en eau de pomme de terre



Besoins en eau des cultures

Station ETo: Culture:
 Station Pluie: Date de plantation:

Mois	Décade	Phase	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
			coeff	mm/jour	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Nov	1	Init	0.70	2.01	20.1	0.0	20.1
Nov	2	Init	0.70	1.60	16.0	0.0	16.0
Nov	3	Crois	0.76	1.58	15.8	0.0	15.8
Déc	1	Crois	0.87	1.61	16.1	0.0	16.1
Déc	2	Crois	0.97	1.55	15.5	0.0	15.5
Déc	3	Mi-sais	1.06	1.86	20.5	0.0	20.5
Jan	1	Mi-sais	1.07	2.09	20.9	0.0	20.9
Jan	2	Mi-sais	1.07	2.23	22.3	0.0	22.3
Jan	3	Mi-sais	1.07	2.51	27.6	0.0	27.6
Fév	1	Mi-sais	1.07	2.73	27.3	0.0	27.3
Fév	2	Mi-sais	1.07	2.98	29.8	0.0	29.8
Fév	3	Mi-sais	1.07	3.73	29.8	0.0	29.8
Mar	1	Mi-sais	1.07	4.58	45.8	0.0	45.8
Mar	2	Mi-sais	1.07	5.33	53.3	0.0	53.3
Mar	3	Mi-sais	1.07	5.66	62.2	0.0	62.2
Avr	1	Mi-sais	1.07	5.95	59.5	0.0	59.5
Avr	2	Arr-sais	1.06	6.23	62.3	0.0	62.3
Avr	3	Arr-sais	1.00	6.32	63.2	0.0	63.2
Mai	1	Arr-sais	0.93	6.33	63.3	0.0	63.3
Mai	2	Arr-sais	0.87	6.28	62.8	0.0	62.8
Mai	3	Arr-sais	0.81	6.19	55.7	0.0	55.7
					789.7	0.0	789.7

Figure C.4 Besoins en eau de l'oignon

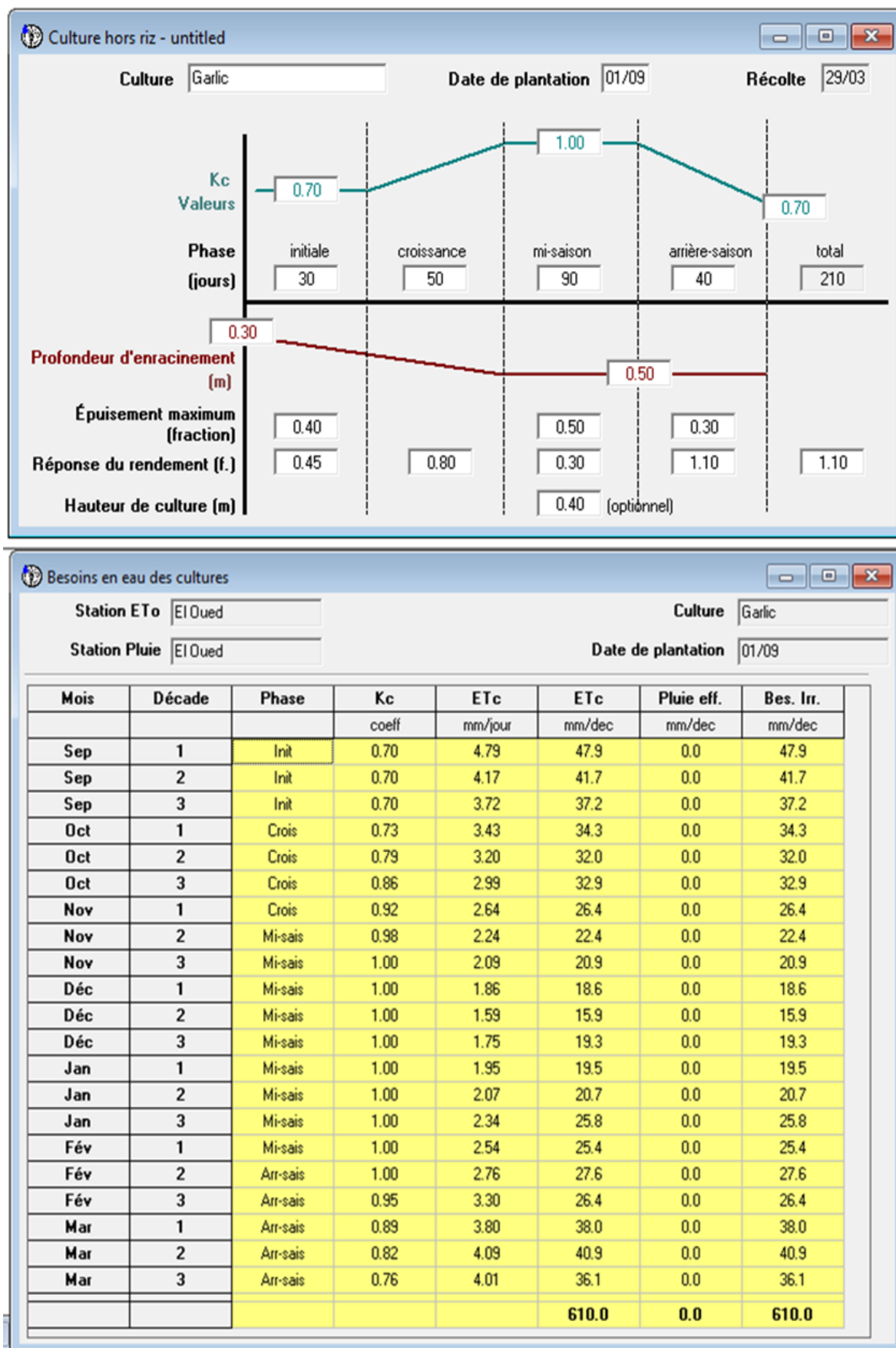


Figure C.5 Besoins en eau de l'ail

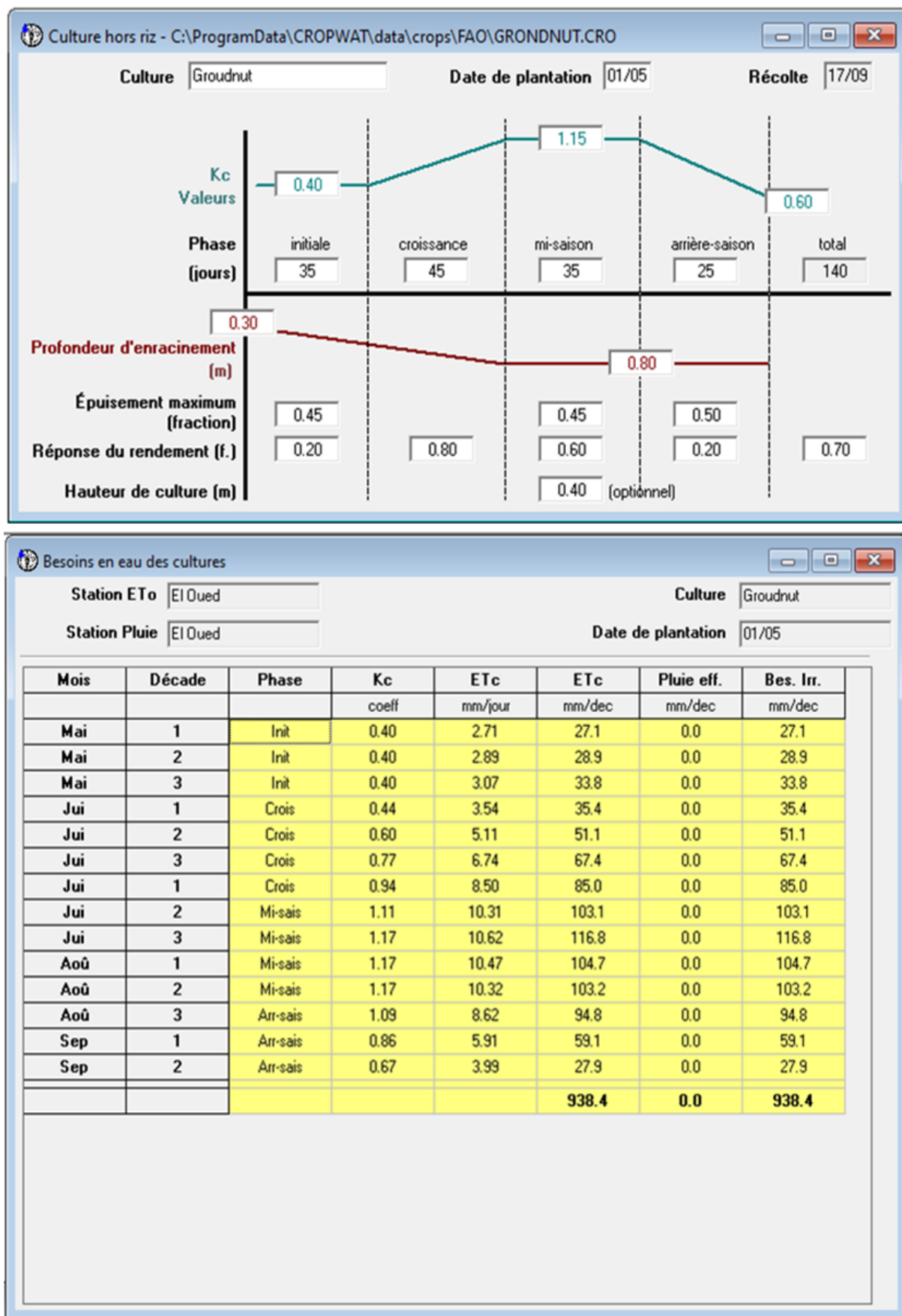


Figure C.6 Besoins en eau de l'arachide

Annexe D

Projet solaire PV de Timimoune



Figure D.1 Station PV pour deux pivots Zimmatic



Figure D.2 Boites de jonction




Figure D.2 Pivot d'irrigation Zimmatic

Annexe E

Les fiches techniques des équipements utilisés dans la simulation

E.1 Module PV

Solar Panel Guide						
Specification Data Sheet						
Risen Energy Co., Ltd.						
RSM144-6-395-420BMDG						
RSM144-6-400BMDG						
						
ELECTRICAL DATA (STC)						
Model Number	RSM144-6-395BMDG	RSM144-6-400BMDG	RSM144-6-405BMDG	RSM144-6-410BMDG	RSM144-6-415BMDG	RSM144-6-420BMDG
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	395	400	405	410	415	420
Open Circuit Voltage-Voc(V)	48.45	48.60	48.75	48.90	49.00	49.10
Short Circuit Current-Isc(A)	10.40	10.50	10.60	10.70	10.80	10.90
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	40.35	40.45	40.55	40.65	40.70	40.80
Maximum Power Current-Impp(A)	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30
Module Efficiency (%) ★	19.4	19.7	19.9	20.2	20.4	20.6
STC: Irradiance 1000 W/m ² , Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3. Bifacial factor: 70%±5 ★ Module Efficiency (%): Round-off to the nearest number						
ELECTRICAL DATA (NMOT)						
Model Number	RSM144-6-395BMDG	RSM144-6-400BMDG	RSM144-6-405BMDG	RSM144-6-410BMDG	RSM144-6-415BMDG	RSM144-6-420BMDG
Maximum Power-Pmax (Wp)	295.6	299.3	303.1	306.9	309.2	312.7
Open Circuit Voltage-Voc (V)	44.60	44.70	44.90	44.99	45.63	45.70
Short Circuit Current-Isc (A)	8.53	8.61	8.69	8.77	8.80	8.87
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	37.00	37.05	37.14	37.24	37.30	37.40
Maximum Power Current-Impp (A)	8.00	8.08	8.16	8.24	8.29	8.36

E.2 Onduleur (45 kW) pour pompage solaire - triphasé

jntech



Technical Parameters

Manufacturer	Jntech Renewable Energy
Model	JNP45KH
D.C. Input	
D.C. Max. Input Voltage	880V _{DC}
Recommended MPPT Voltage	460~850V _{DC}
D.C. Max. Input Current	100A
Max. MPPT Efficiency	99%
Number of String	1
A.C. Output	
Max. Motor Output Power	45kW
Rated Output Voltage	380~460V _{AC} , three phase
Output Frequency Range	0~50/60Hz
Rated Output Current	85A

E.3 Onduleur (7.67 kW) pour pompage solaire - triphasé

Manufacturer	ABB
Model	TRIO-7.5-TL-OUTD-400
D.C. Max. Input Voltage	1000 V _{DC}
Recommended MPPT Voltage	175-950 V _{DC}
D.C. Max. Input Current	15 A
Max. MPPT Efficiency	98%
Number of String	2
Nominal PV Power	7.67 kW
Rated Output Voltage	380~460Vac, three phase
Output Frequency	50Hz
Rated Output Current	12.5A



E.4 Batterie Pb-acide, scellée, Gel

TYPE	AG12V200Ah
Nominal Voltage	12V
Rated Capacity (Ah)	200
Length	558
Width	125
Height	305
Total Height	316
Weight (Kg)	61.0



Annexe F

Sorties du logiciel PVsyst

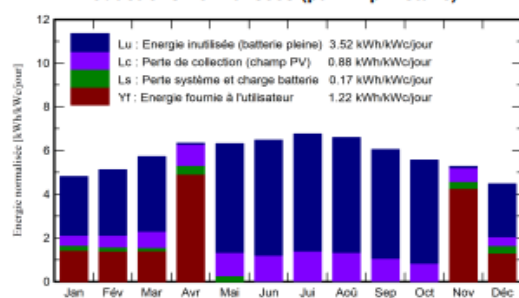
F.1 Systèmes PV autonomes

F.1.1 Pivot moderne

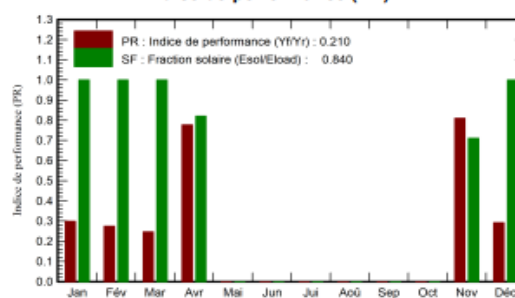
a) Planification traditionnelle

Caractéristiques du champ de capteurs	
Module PV	
Fabricant	Risen Solar
Modèle	RSM-144-6-400-M (Base de données PVsyst originale)
Puissance unitaire	400 Wc
Nombre de modules PV	458 unités
Nominale (STC)	183 kWc
Modules	229 Chaînes x 2 En série
Aux cond. de fonct. (50°C)	
Pmpp	166 kWc
U mpp	73 V
I mpp	2287 A
Régulateur	
Régulateur universel	
Technologie	Convertisseur MPPT
Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.
Convertisseur	
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %
Puissance PV totale	
Nominale (STC)	183 kWc
Total	458 modules
Surface modules	919 m ²
Surface cellule	798 m ²
Batterie	
Fabricant	Narada
Modèle	AcmeG 12V 200
Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre d'unités	135 en parallèle x 4 en série
Décharge : min. SOC	20.0 %
Energie stockée	1068.6 kWh
Caractéristiques du banc de batteries	
Tension	48 V
Capacité nominale	27000 Ah (C10)
Température	Fixée 20 °C
Seuils de régulation batterie	
Seuils de commande selon	Calcul SOC
Charge	SOC = 0.92 / 0.75
environ	55.7 / 51.3 V
Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
environ	47.7 / 49.7 V

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



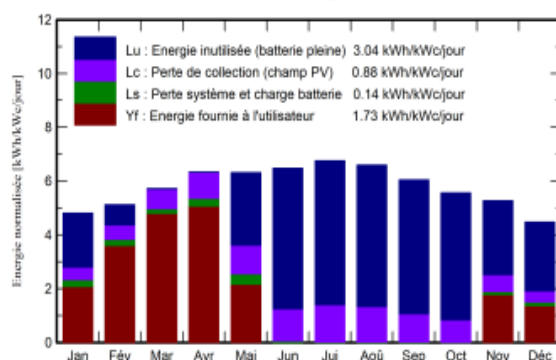
Bilans et résultats principaux

	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SoIFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	98.2	146.8	24279	15193	0	8162	8162	1.000
Février	108.1	141.1	23234	15376	0	7217	7217	1.000
Mars	151.2	174.1	27890	19378	0	8015	8015	1.000
Avril	180.5	186.3	28283	232	5932	27046	32978	0.820
Mai	204.4	191.5	29738	28254	0	0	0	1.000
Juin	210.1	189.9	28932	28879	0	0	0	1.000
Juillet	222.9	205.0	30470	30409	0	0	0	1.000
Août	201.8	200.5	29894	29840	0	0	0	1.000
Septembre	161.8	178.3	27427	27381	0	0	0	1.000
Octobre	135.8	169.6	26838	26790	0	0	0	1.000
Novembre	106.8	156.0	24521	261	9526	23452	32978	0.711
Décembre	89.2	136.7	22663	13662	0	7420	7420	1.000
Année	1870.7	2075.8	324169	235653	15458	81312	96770	0.840

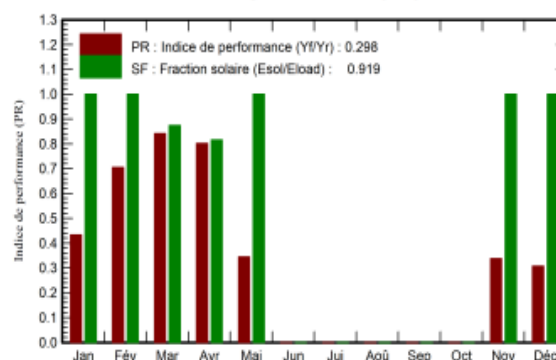
b) Planification CROPWAT

Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV		Batterie	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Narada
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	AcmeG 12V 200
(Base de données PVsyst originale)			
Puissance unitaire	400 Wc	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre de modules PV	240 unités	Nombre d'unités	73 en parallèle x 4 en série
Nominale (STC)	96.0 kWc	Décharge : min. SOC	20.0 %
Modules	120 Chaînes x 2 En série	Energie stockée	577.9 kWh
Aux cond. de fonct. (50°C)		Caractéristiques du banc de batteries	
Pmpp	87.2 kWc	Tension	48 V
U mpp	73 V	Capacité nominale	14600 Ah (C10)
I mpp	1198 A	Température	Fixée 20 °C
Régulateur		Seuils de régulation batterie	
Régulateur universel		Seuils de commande selon	Calcul SOC
Technologie	Convertisseur MPPT	Charge	SOC = 0.90 / 0.75
Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.	environ	54.5 / 51.3 V
Convertisseur		Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	environ	47.8 / 49.7 V
Puissance PV totale			
Nominale (STC)	96 kWc		
Total	240 modules		
Surface modules	482 m ²		
Surface cellule	418 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



Bilans et résultats principaux

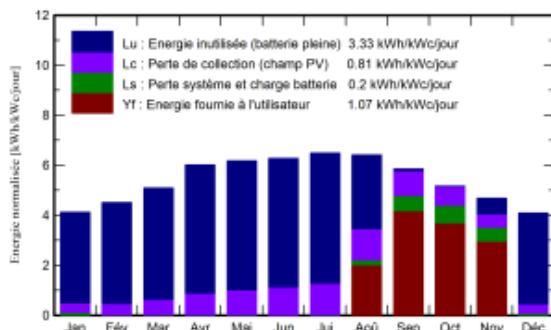
	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SoIFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	98.2	146.8	12647	5959	0	6197	6197	1.000
Février	108.1	141.1	11941	2014	0	9711	9711	1.000
Mars	151.2	174.1	14213	0	2064	14306	16370	0.874
Avril	180.5	186.3	14817	0	3303	14617	17920	0.816
Mai	204.4	191.5	15306	8008	0	6471	6471	1.000
Juin	210.1	189.9	15156	15015	0	0	0	1.000
Juillet	222.9	205.0	15967	15934	0	0	0	1.000
Août	201.8	200.5	15665	15636	0	0	0	1.000
Septembre	161.8	178.3	14372	14348	0	0	0	1.000
Octobre	135.8	169.6	14064	14038	0	0	0	1.000
Novembre	106.8	156.0	13145	7892	0	5120	5120	1.000
Décembre	89.2	136.7	11896	7577	0	4090	4090	1.000
Année	1870.7	2075.8	169188	106423	5367	60512	65879	0.919

F.1.2 Pivot artisanal

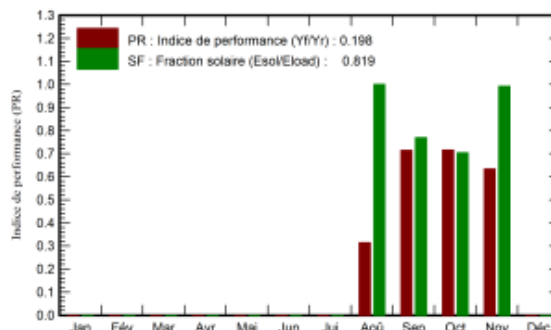
a) Planification traditionnelle

Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV		Batterie	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Narada
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	AcmeG 12V 200
(Base de données PVsyst originale)			
Puissance unitaire	400 Wc	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre de modules PV	24 unités	Nombre d'unités	6 en parallèle x 4 en série
Nominale (STC)	9.60 kWc	Décharge : min. SOC	20.0 %
Modules	12 Chaînes x 2 En série	Energie stockée	47.5 kWh
Aux cond. de fonct. (50°C)		Caractéristiques du banc de batteries	
Pmpp	8.72 kWc	Tension	48 V
U mpp	73 V	Capacité nominale	1200 Ah (C10)
I mpp	120 A	Température	Fixée 20 °C
Régulateur		Seuils de régulation batterie	
Régulateur universel		Seuils de commande selon	Calcul SOC
Technologie	Convertisseur MPPT	Charge	SOC = 0.90 / 0.75
Coef. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.	environ	54.6 / 51.3 V
Convertisseur		Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	environ	47.6 / 49.7 V
Puissance PV totale			
Nominale (STC)	10 kWc		
Total	24 modules		
Surface modules	48.2 m ²		
Surface cellule	41.8 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



Bilans et résultats principaux

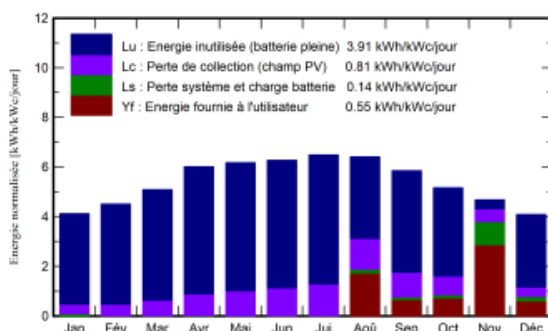
	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUused	E_Miss	E_User	E_Load	SoIFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	85.5	125.6	1106	1075	0.0	0	0	1.000
Février	96.7	124.1	1085	1083	0.0	0	0	1.000
Mars	137.3	154.7	1326	1324	0.0	0	0	1.000
Avril	171.0	176.8	1477	1474	0.0	0	0	1.000
Mai	198.4	187.3	1536	1533	0.0	0	0	1.000
Juin	202.4	184.0	1482	1480	0.0	0	0	1.000
Juillet	212.5	196.7	1549	1546	0.0	0	0	1.000
Août	195.5	195.0	1507	876	0.0	600	600	1.000
Septembre	156.7	172.3	1346	18	360.8	1204	1565	0.769
Octobre	127.2	157.5	1261	0	464.2	1101	1565	0.703
Novembre	96.9	138.4	1158	182	7.0	854	861	0.992
Décembre	80.3	124.9	1104	1081	0.0	0	0	1.000
Année	1760.3	1937.3	15934	11672	832.0	3759	4591	0.819

b) Planification CROPWAT

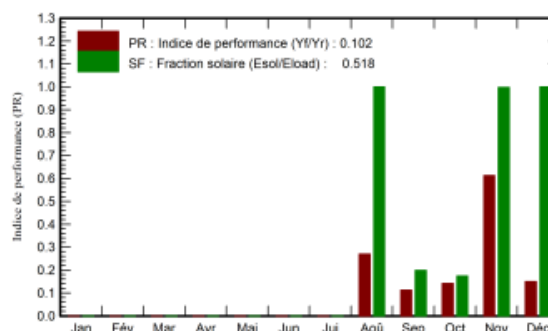
Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV		Batterie	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Narada
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	AcmeG 12V 200
(Base de données PVsyst originale)			
Puissance unitaire	400 Wc	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre de modules PV	14 unités	Nombre d'unités	6 en parallèle x 2 en série
Nominale (STC)	5.60 kWc	Décharge : min. SOC	20.0 %
Modules	7 Chaînes x 2 En série	Energie stockée	23.7 kWh
Aux cond. de fonct. (50°C)		Caractéristiques du banc de batteries	
Pmpp	5.09 kWc	Tension	24 V
U mpp	73 V	Capacité nominale	1200 Ah (C10)
I mpp	70 A	Température	Fixée 20 °C
Régulateur		Seuils de régulation batterie	
Régulateur universel		Seuils de commande selon	Calcul SOC
Technologie	Convertisseur MPPT	Charge	SOC = 0.90 / 0.75
Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.	environ	27.1 / 25.3 V
Convertisseur		Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	environ	23.1 / 24.6 V
Puissance PV totale			
Nominale (STC)	6 kWc		
Total	14 modules		
Surface modules	28.1 m ²		
Surface cellule	24.4 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



Bilans et résultats principaux

	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	85.5	125.6	645.3	630.0	0.0	0.0	0.0	1.000
Février	96.7	124.1	633.0	632.1	0.0	0.0	0.0	1.000
Mars	137.3	154.7	773.4	772.3	0.0	0.0	0.0	1.000
Avril	171.0	176.8	861.5	860.4	0.0	0.0	0.0	1.000
Mai	198.4	187.3	895.8	894.7	0.0	0.0	0.0	1.000
Juin	202.4	184.0	864.5	863.5	0.0	0.0	0.0	1.000
Juillet	212.5	196.7	903.4	902.3	0.0	0.0	0.0	1.000
Août	195.5	195.0	885.6	569.5	0.0	300.0	300.0	1.000
Septembre	156.7	172.3	812.4	687.7	445.5	110.5	556.0	0.199
Octobre	127.2	157.5	760.3	617.3	601.1	126.9	728.0	0.174
Novembre	96.9	138.4	673.7	59.7	1.3	481.7	483.0	0.997
Décembre	80.3	124.9	637.7	506.4	0.0	106.0	106.0	1.000
Année	1760.3	1937.3	9346.7	7995.9	1047.9	1125.1	2173.0	0.518

F.2 Systèmes PV mixtes hybride et autonome

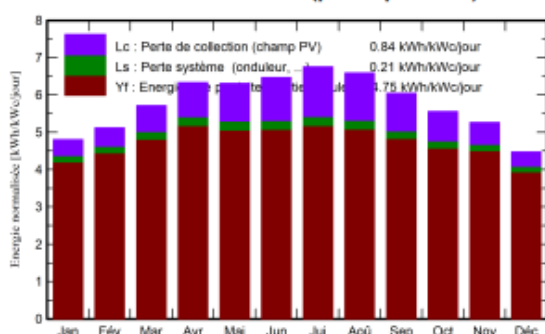
F.2.1 Pivot moderne

a) Système de pompe solaire hybride

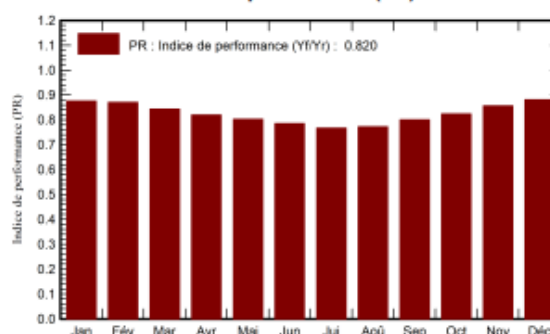
Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV		Onduleur	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Jntech Renewable Energy
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	45 KWac onduleur
(Base de données PVsyst originale)		(Paramètres définis par l'utilisateur)	
Puissance unitaire	400 Wc	Puissance unitaire	45.0 kWac
Nombre de modules PV	128 unités	Nombre d'onduleurs	1 unité
Nominale (STC)	51.2 kWc	Puissance totale	45.0 kWac
Modules	8 Chaînes x 16 En série	Tension de fonctionnement	460-850 V
Aux cond. de fonct. (50°C)		Rapport Pnom (DC:AC)	1.14
Pmpp	46.5 kWc		
U mpp	582 V		
I mpp	80 A		
Puissance PV totale		Puissance totale onduleur	
Nominale (STC)	51 kWc	Puissance totale	45 kWac
Total	128 modules	Nbre d'onduleurs	1 Unité
Surface modules	257 m ²	Rapport Pnom	1.14
Surface cellule	223 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



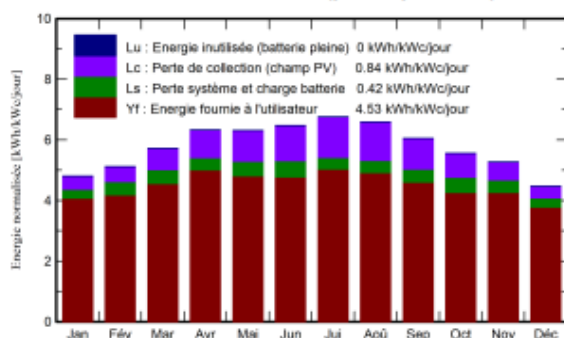
Bilans et résultats principaux

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	ratio
Janvier	98.2	33.4	10.52	148.9	146.8	6.957	6.678	0.876
Février	108.1	48.2	12.85	143.4	141.1	6.643	6.389	0.870
Mars	151.2	68.7	17.99	177.2	174.1	7.979	7.651	0.843
Avril	180.5	81.0	22.46	189.9	186.3	8.332	7.966	0.819
Mai	204.4	99.0	27.78	195.6	191.5	8.421	8.039	0.803
Juin	210.1	100.9	32.30	194.1	189.9	8.175	7.808	0.786
Juillet	222.9	94.0	36.15	209.5	205.0	8.615	8.227	0.767
Août	201.8	91.3	35.01	204.4	200.5	8.459	8.087	0.773
Septembre	161.8	73.8	29.83	181.5	178.3	7.748	7.438	0.801
Octobre	135.8	59.6	24.33	172.4	169.6	7.578	7.274	0.824
Novembre	106.8	34.6	16.20	158.0	156.0	7.196	6.932	0.857
Décembre	89.2	34.6	11.44	138.6	136.7	6.497	6.255	0.881
Année	1870.7	819.1	23.13	2113.6	2075.8	92.601	88.743	0.820

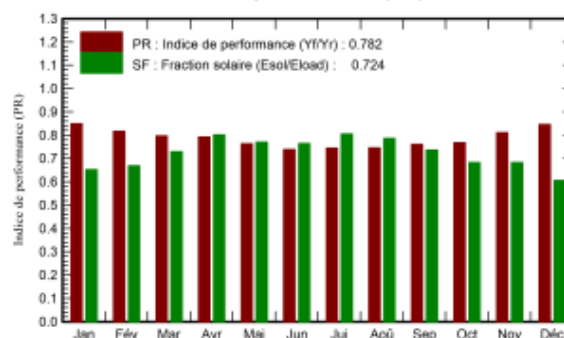
b) Système PV autonome pour les moteurs et les auxiliaires

Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV		Batterie	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Narada
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	AcmeG 12V 200
(Base de données PVsyst originale)			
Puissance unitaire	400 Wc	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre de modules PV	52 unités	Nombre d'unités	16 en parallèle x 4 en série
Nominale (STC)	20.80 kWc	Décharge : min. SOC	20.0 %
Modules	4 Chaînes x 13 En série	Energie stockée	126.7 kWh
Aux cond. de fonct. (50°C)		Caractéristiques du banc de batteries	
Pmpp	18.89 kWc	Tension	48 V
U mpp	473 V	Capacité nominale	3200 Ah (C10)
I mpp	40 A	Température	Fixée 20 °C
Régulateur		Seuils de régulation batterie	
Régulateur universel		Seuils de commande selon	Calcul SOC
Technologie	Convertisseur MPPT	Charge	SOC = 0.92 / 0.75
Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.	environ	55.1 / 50.7 V
Convertisseur		Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	environ	47.1 / 49.1 V
Puissance PV totale			
Nominale (STC)	21 kWc		
Total	52 modules		
Surface modules	104 m ²		
Surface cellule	90.6 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



Bilans et résultats principaux

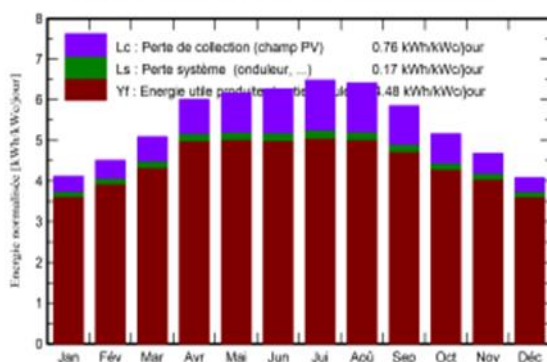
	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	98.2	146.8	2709	0.000	1400	2630	4030	0.653
Février	108.1	141.1	2590	0.090	1204	2436	3640	0.669
Mars	151.2	174.1	3105	0.090	1091	2939	4030	0.729
Avril	180.5	186.3	3237	0.086	772	3128	3900	0.802
Mai	204.4	191.5	3273	0.000	926	3104	4030	0.770
Juin	210.1	189.9	3177	0.084	917	2983	3900	0.765
Juillet	222.9	205.0	3347	0.082	784	3246	4030	0.805
Août	201.8	200.5	3287	0.000	860	3170	4030	0.787
Septembre	161.8	178.3	3017	0.000	1027	2873	3900	0.737
Octobre	135.8	169.6	2951	0.000	1278	2752	4030	0.683
Novembre	106.8	156.0	2805	0.000	1236	2664	3900	0.683
Décembre	89.2	136.7	2535	0.000	1590	2440	4030	0.605
Année	1870.7	2075.8	36034	0.432	13084	34366	47450	0.724

F.2.2 Pivot artisanal

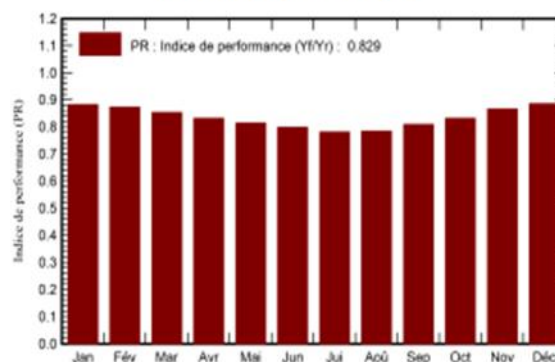
a) Système de pompe solaire hybride

Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV		Onduleur	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	ABB
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	TRIO-7.5-TL-OUTD-400
(Base de données PVsyst originale)		(Base de données PVsyst originale)	
Puissance unitaire	400 Wc	Puissance unitaire	7.50 kWac
Nombre de modules PV	20 unités	Nombre d'onduleurs	2 * MPPT 50% 1 unité
Nominale (STC)	8.00 kWc	Puissance totale	7.5 kWac
Modules	2 Chaînes x 10 En série	Tension de fonctionnement	175-950 V
Aux cond. de fonct. (50°C)		Rapport Pnom (DC:AC)	1.07
Pmpp	7.27 kWc		
U mpp	364 V		
I mpp	20 A		
Puissance PV totale		Puissance totale onduleur	
Nominale (STC)	8 kWc	Puissance totale	7.5 kWac
Total	20 modules	Nbre d'onduleurs	1 Unité
Surface modules	40.1 m ²	Rapport Pnom	1.07
Surface cellule	34.8 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



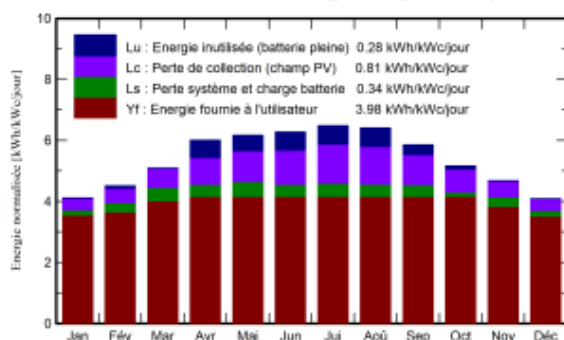
Bilans et résultats principaux

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	ratio
Janvier	85.5	33.6	10.64	127.5	125.6	0.932	0.900	0.882
Février	96.7	46.7	12.70	126.3	124.1	0.914	0.881	0.873
Mars	137.3	73.5	17.56	157.8	154.7	1.117	1.077	0.853
Avril	171.0	81.9	21.81	180.3	176.8	1.245	1.200	0.832
Mai	198.4	100.6	26.82	191.2	187.3	1.293	1.246	0.815
Juin	202.4	101.6	31.31	188.2	184.0	1.248	1.202	0.799
Juillet	212.5	100.3	35.19	201.0	196.7	1.305	1.256	0.781
Août	195.5	93.5	34.14	198.7	195.0	1.295	1.247	0.785
Septembre	156.7	76.1	29.23	175.6	172.3	1.179	1.137	0.809
Octobre	127.2	61.0	24.19	160.2	157.5	1.105	1.066	0.832
Novembre	96.9	40.9	16.28	140.4	138.4	1.008	0.973	0.866
Décembre	80.3	31.3	11.50	126.7	124.9	0.930	0.898	0.886
Année	1760.3	840.8	22.67	1973.8	1937.3	13.571	13.083	0.829

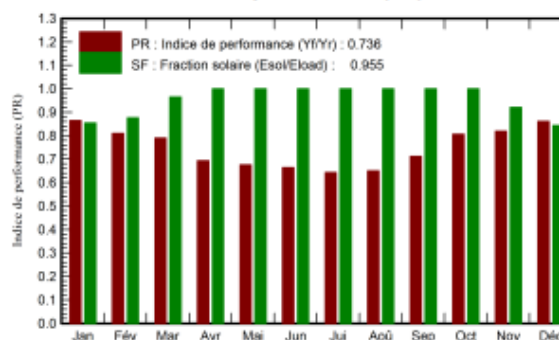
b) Système PV autonome pour le moteur

Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV		Batterie	
Fabricant	Risen Solar	Fabricant	Narada
Modèle	RSM-144-6-400-M	Modèle	AcmeG 12V 200
(Base de données PVsyst originale)			
Puissance unitaire	400 Wc	Technologie	Pb-acide, scellée, Gel
Nombre de modules PV	6 unités	Nombre d'unités	2 en parallèle x 4 en série
Nominale (STC)	2400 Wc	Décharge : min. SOC	20.0 %
Modules	3 Chaînes x 2 En série	Energie stockée	15.8 kWh
Aux cond. de fonct. (50°C)		Caractéristiques du banc de batteries	
Pmpp	2180 Wc	Tension	48 V
U mpp	73 V	Capacité nominale	400 Ah (C10)
I mpp	30 A	Température	Fixée 20 °C
Régulateur		Seuils de régulation batterie	
Régulateur universel		Seuils de commande selon	Calcul SOC
Technologie	Convertisseur MPPT	Charge	SOC = 0.92 / 0.75
Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/Élém.	environ	55.0 / 50.7 V
Convertisseur		Décharge	SOC = 0.20 / 0.45
Efficacité maxi et EURO	97.0 / 95.0 %	environ	47.2 / 49.1 V
Puissance PV totale			
Nominale (STC)	2 kWc		
Total	6 modules		
Surface modules	12.0 m ²		
Surface cellule	10.5 m ²		

Productions normalisées (par kWp installé)



Indice de performance (PR)



Bilans et résultats principaux


	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
Janvier	85.5	125.6	265.5	0.01	45.23	264.8	310.0	0.854
Février	96.7	124.1	260.4	5.03	34.54	245.5	280.0	0.877
Mars	137.3	154.7	318.1	0.00	10.72	299.3	310.0	0.965
Avril	171.0	176.8	355.7	41.01	0.00	300.0	300.0	1.000
Mai	198.4	187.3	369.3	37.71	0.00	310.0	310.0	1.000
Juin	202.4	184.0	356.8	42.09	0.00	300.0	300.0	1.000
Juillet	212.5	196.7	372.9	44.98	0.00	310.0	310.0	1.000
Août	195.5	195.0	370.2	44.44	0.00	310.0	310.0	1.000
Septembre	156.7	172.3	337.1	22.63	0.00	300.0	300.0	1.000
Octobre	127.2	157.5	315.4	7.60	0.00	310.0	310.0	1.000
Novembre	96.9	138.4	287.8	0.01	23.84	276.2	300.0	0.921
Décembre	80.3	124.9	265.2	0.00	48.26	261.7	310.0	0.844
Année	1760.3	1937.3	3874.4	245.51	162.58	3487.4	3650.0	0.955

Annexe G

Produits scientifiques



G.1 Publications

ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS
2022, VOL. 44, NO. 3, 8299–8313
<https://doi.org/10.1080/15567036.2022.210929>

 Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

 Check for updates

Water-energy nexus: A systematic analysis and evaluation of a center-pivot irrigation system


Mohamed Brik ^a, Ayoub Guerrah ^{a,b}, and Abdelmalek Atia ^{a,b}

^aUDERZA Unit, Faculty of Technology, University of El Oued, El Oued, Algeria; ^bLEVRES Laboratory, Faculty of Technology, University of El Oued, El Oued, Algeria

ABSTRACT
Water-energy nexus plays a crucial role in addressing the issue of water wasting as well as planning, developing, and optimization of the agricultural product irrigation demands. The objective of this paper is to improve the water and energy use in value crops irrigated by center pivot systems under conventional irrigation planning in southern Algeria. This study is based on the field evaluation of the real water and electrical energy consumption, in two types of center pivot systems, large pivots and traditional Mini-Center Pivot Systems in two different areas (Ouargla and El Oued). Over two years, irrigation campaigns on six pivots systems with six different crops were analyzed to evaluate and characterize their water and electrical energy use. The CROPWAT model was used to determine the crop water requirements and compared with the water volumes currently applied by conventional irrigation planning. The results showed that there was over-consumption of water followed by high electrical energy use due to the poor planning of irrigation, which was generally excessive. In addition, the amount of water applied by conventional irrigation planning and that estimated by CROPWAT do not coincide during the most stages of crop growth. Closer inspection of the results shows that the irrigation water use efficiency for different crops was low and ranged between 0.25 and 3.27 kg/m³ due to the Over-irrigation. Furthermore, the modern pivots presented the most efficient equipment in terms of Energy Use Indicators with 1.1 kW ha⁻¹ while the average of the traditional mini pivots was four times more (4.15 kWh⁻¹). No significant difference was evident between the present specific consumption Es (in the average of 0.274 kWh m⁻³) and those reported in the literature due to high power installed in the pumping station for Mini-Center Pivot Systems. Therefore, the study findings are expected to draw the attention of decision-makers to the extent of wasting water and energy. Also, these findings reveal the harmful effects of farmers' incorrect irrigation practices and motivate them to take strong measures toward sustainable agriculture.

ARTICLE HISTORY
Received 4 January 2022
Revised 25 August 2022
Accepted 26 August 2022

KEYWORDS
Water-energy nexus; energy consumption; irrigation planning; center pivot; Saharan region

CONTACT Abdelmalek Atia  abdelmalek-atia@univ-eloued.dz  LEVRES Laboratory, Faculty of Technology, University of El Oued, El Oued 39000, Algeria
© 2022 Taylor & Francis Group, LLC

G.2 Communications internationales

Contribution de l'énergie solaire photovoltaïque à l'alimentation des pivots d'irrigation : Cas du pivot ANABIB

GUERRAH Ayoub
Département de génie mécanique,
Faculté de Technologie
Université d'El-Oued, Algérie.
ayoub-guerrah@univ-eloued.dz

HAMIDAT Abderrahmane
Centre de Développement des
Energies Renouvelables, CDER
BP. 62 Bouzareah 16340 Alger,
Algerie.
a.hamidat@cder.dz

BRIK Mohamed
Département de génie mécanique,
Université d'El-Oued
Unité de Développement des
Energies Renouvelables dans les
Zones Arides (UDERZA)
El-Oued, Algérie.
brik-mohamed@univ-eloued.dz

SAADALLAH Younés
Département de génie mécanique,
Faculté des sciences et de la
Technologie, Université de Jijel,
Algérie.
sayounes@live.fr

Résumé—L'objectif de cet article est d'étudier la contribution de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque (PV) dans l'alimentation électrique des pivots d'irrigation. L'introduction massive des pivots a engendré des consommations énergétiques très élevées et dans certains cas très nuisibles à l'équilibre du réseau électrique. Dans ce travail, une étude pratique a été adoptée sur un pivot de marque ANABIB pour l'évaluation hydraulique, avec un dimensionnement PV autonome à l'aide d'un logiciel approprié. Deux scénarios d'étude ont été envisagés le premier scénario consiste que le système photovoltaïque autonome prendra en charge l'alimentation électrique des parties suivantes : le pompage de l'eau, la pression hydraulique et les moteurs de traction. Dans le deuxième scénario, le système photovoltaïque alimentera uniquement les moteurs de traction. Les résultats obtenus ont montré que ce type de pivot d'irrigation nécessite une nouvelle étude technique à cause de chute de pression et de débit à l'extrémité aval de la rampe pivot. Deuxièmement, l'exploitation de l'énergie PV dans le premier scénario représente cinq fois le deuxième cas en termes d'énergie et de stockage avec les batteries. Dans ce dernier cas, le système PV réduit la dépendance énergétique du pivot de 20% avec l'énergie de source fossile non renouvelables.

Mots clés —pivot d'irrigation, systèmes photovoltaïques, évaluation hydraulique.

I. INTRODUCTION

Le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire comme énergie renouvelable à des fins d'irrigation pourrait être plus important, car les besoins en énergie (pomper de l'eau pour répondre aux besoins des cultures) ainsi que la production d'énergie dépendent fortement du rayonnement solaire entrant. Le développement d'approches de conception holistiques, qui intègrent les caractéristiques du système photovoltaïque (PV) ainsi que les caractéristiques de fonctionnement du système d'irrigation, les caractéristiques du sol et des cultures, la stratégie de gestion de l'irrigation et les variables climatiques locales, est essentiel pour assurer la faisabilité technique de cette technologie dans de nouveaux domaines.

Un système d'irrigation photovoltaïque autonome peut comprendre un module ou un générateur photovoltaïque, un contrôleur de charge et / ou un onduleur, des batteries, une pompe, un moteur et d'autres accessoires de montage et de câblage. Il existe de nombreuses applications de pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque. Dans ces systèmes de pompage photovoltaïque, l'eau pompée est stockée dans un réservoir avec une hauteur suffisante pour irriguer un champ agricole. Hamidat, Benyoucef et Hartani[1,2] ont présenté une méthode de dimensionnement qui permet de déterminer la surface à irriguer par un système de pompage photovoltaïque en fonction de type de culture et la hauteur manométrique du pompage. Glasnovic et Margeta[3] ont présenté une procédure de dimensionnement pour un système d'irrigation à ruissellement photovoltaïque prenant en compte les caractéristiques des cultures, la disponibilité des ressources en eau et la production d'électricité par le générateur photovoltaïque.

Dans la littérature, la conception et l'évaluation des systèmes d'irrigation à pivot central alimentés par l'énergie solaire sont en nombre très limités [4-7]. Dans un système d'irrigation à pivot central, il faut de l'énergie pour pomper et appliquer l'eau à une certaine pression pendant un temps prédéterminé en fonction de la zone irriguée, des spécifications du système de pivot et de la profondeur d'application de l'eau souhaitée, ainsi que pour motoriser le système.

Dans le présent travail, un système PV est proposé pour optimiser la demande de charge pour le système d'irrigation à pivot central de type ANANBIB installé dans une exploitation agricole à Al Hadjira (W. Ouargla) pour la production de l'orge après une évaluation hydraulique expérimentale faite sur le système. Des données locales standard ont été définies pour l'analyse du logiciel.

La figure 1 montre la méthodologie nécessaire pour déterminer le système PV approprié.



Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'irrigation par pivot dans le Sahara algérien

BRİK Mohamed^{#1}, GUERRAH Ayoub^{*2}, HAMIDAT Abderrahmane^{†3}, ATIA Abdelmalek^{*4}

Hadji Mohammed Salah^{#4}

[#]Département de génie mécanique, Université d'El-Oued, Unité de développement des Energies Renouvelables dans les Zones Arides (UDERZA) El-Oued, Algérie.

^{*}Département de génie mécanique, Faculté de Technologie, Université d'El-Oued, Algérie.

¹brik-mohamed@univ-eloued.dz ²ayoub-guerrah@univ-eloued.dz

³abdelmalek-atia@univ-eloued.dz ⁴hadji-msalah@univ-eloued.dz

[†]Centre de développement des Energies Renouvelables, CDER BP.62 Bouzareah 16340 Alger, Algérie.

a.hamidat@cder.dz

Résumé— Ce travail porte sur l'exploitation de l'énergie photovoltaïque en tant qu'approche pour alimenter en énergie le pivot central d'irrigation adapté dans le secteur de l'agriculture dans le sud algérien. L'augmentation continue de l'installation de ces machines empêche le réseau de leur fournir de l'énergie, d'autant plus qu'un nombre important d'entre elles ont été installées à l'écart de ce dernier. Vu l'ensoleillement très présent en Algérie l'utilisation de l'énergie solaire pour l'agriculture est devenu très important. Quatre exploitations agricoles contenant quatre pivots, deux pivots modernes du type ANABIB et deux pivots traditionnels installés respectivement à El-Hadjera et El-oued ont été choisis pour évaluer expérimentalement leur consommation électrique à l'aide de l'analyseur d'énergie électrique CHAUVIN ARNOUX C.A.8332B. Le logiciel PVsyst a été utilisé pour simuler le système photovoltaïque autonome approprié de chacun des pivots étudiés.

Mots clés — pivot central; consommation; évaluation; système photovoltaïque; pompage solaire; Sahara algérien

I. INTRODUCTION

Au début de l'investissement de l'état algérienne dans l'irrigation par aspersion, des rampes pivotantes ont été adoptés surtout dans le sud de pays dans le but de redynamiser le secteur agricole et mener à bien certaines cultures stratégiques [1]. Les pivots conventionnels de grande dimension ANABIB ont été introduit dans le marché depuis 1988, où le premier appareil a été livré le 8 février 1988 à la GEP EL Amel (Adrar), la wilaya d'Adrar suivi de celle de Ouargla ont été les régions les mieux dotées par ces machines d'irrigation [2]. La wilaya d'El-Oued située au sud-est du pays a aussi connu dans les deux dernières décennies un développement agricole important, où les agriculteurs sont orientés vers la culture de la pomme de terre sous l'irrigation des mini pivots

traditionnels de conception et fabrication local, et selon les statistiques du ministère de l'agriculture le nombre de ces pivots installés atteint environs 35000 unités avec une production de 1.1 million de tonnes en 2014 [3].

Bien que les pivots d'irrigation présentent de nombreux avantages, ils consomment beaucoup d'énergie électrique, aussi l'extension importante de leur utilisation a eu un impact négative sur l'équilibre du réseau électrique notamment durant la période chaude, avec un nombre important de ces irrigateurs électriques sont installés loin de réseau où leur alimentation est assurée par des générateurs diesel, dans ce contexte vient le rôle de l'exploitation dans le solaire photovoltaïque (PV) dans ces régions. La situation géographique de l'Algérie caractérisée par une importante intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jours pendant plusieurs mois favorise le développement de l'utilisation de l'énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications du pompage [4].

Plusieurs travaux sur le dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque ont été fait, mais malheureusement, peu d'efforts ont été consacré à l'étude des applications de la technologie PV avec un système d'irrigation à pivot central, dans lequel l'énergie nécessaire pour pomper l'eau au débit et à la pression souhaités, ainsi que pour faire déplacer ce système [5]. Citons



Diagnostic des Différents Pivots D'irrigation Traditionnel Adopté dans la Région d'El-Oued

Hadji Mohammed Salah^{#1}, Guerrah Ayoub^{#2}, Atia Abdelmalek^{#3}, Mansouri Khaled^{#4} et Brik Mohamed^{#5}

#Département de génie Mécanique, Université d'El Oued,

El Oued, Algérie

¹hadji-msalah@univ-eloued.dz

²ayoub-guerrah@univ-eloued.dz

³abdelmalek-atia@univ-eloued.dz

⁴khaled-mansouri@univ-eloued.dz

⁵brik-mohamed@univ-eloued.dz

Résumé— Le système d'irrigation pivot traditionnel utilisé dans la région d'El Oued devenu très important, en particulier en tant que pilier économique national. L'objectif de ce travail est de évaluer la performance hydraulique des différents systèmes pivot d'irrigation installé dans la région de El-Oued après, de développer une méthodologie basée sur des équations hydrauliques pour améliorer la performance de ces systèmes traditionnels. Les résultats montrent la possibilité et l'importance d'améliorer les performances hydraulique de ces systèmes par le changement de positions des buses jusqu'à attendre plus de 80% de coefficient d'uniformité de Hermann et Hein. Aussi, cette recherche réalise une comparaison hydraulique entre huit pivots différents installés sur la région de l'El Oued. En termes de distribution régulière de l'eau sur le sol l'étude constate que la conception n'était pas conforme aux normes Internationales, car ces performances hydrauliques étaient extrêmement médiocres. Il est prévu que cette étude serve de point de départ à partir duquel une uniformité améliorée pourra être développée à l'avenir.

Les mots clés— irrigation, pivot traditionnel, performance hydraulique, coefficient d'uniformité, buses.

I. INTRODUCTION

Le système d'irrigation traditionnel est largement utilisé à EL-OUED à cause de leurs avantages tel que la facilité de son construction et la basse couté de son entretien. On observe depuis une vingtaine d'années l'émergence de bassins de production maraichère dans le Sahara algérien par la mobilisation des eaux souterraines profondes, en marge des oasis traditionnelles. La région d'El-Oued a été désignée permet la plus grande région productrice des pommes de terre dans le monde arabe, si les parties prenantes devaient élaborer de nouvelles politiques en matière de technologie d'irrigation, notamment pour étendre la superficie cultivée. Une étude permet de caractériser le dispositif technique des différents pivots conçus successivement et mené des entretiens semi-

directifs auprès de 24 agriculteurs, dix artisans, quatre commerçants locaux et quatre conseillers de sociétés d'agrofourmiture ; pour analyser le processus d'innovation ayant permis l'émergence et la diffusion du pivot artisanal [1]. Un travail a touché l'évaluation de la répartition pluviométrique et du coefficient d'uniformité, ainsi que la vérification préalable du plan de busage qui a conduit à la substitution de trois buses par d'autres procurées à partir d'autres pivots, le diagnostic de fonctionnement au champ d'une rampe pivotante, système d'aspersion mécanisée en cours d'utilisation et en bon de fonctionnement, adoptée dans la Société de Mise en Valeur et de Développement Agricole (SMVDA) El Khir, délégation de M'Hamdia, gouvernorat de Ben Arous (Nord de la Tunisie) et l'appréciation de la qualité d'arrosage obtenu [2]. Le contraste et la différence de la quantité d'eau pulvérisée sur la longueur du tube est le plus grand problème dans les axes traditionnels de fabrication, ce qui conduit la variation de la productivité dans certaines parties de la zone irriguée. L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances hydraulique grâce à la distribution scientifique des distances entre les buses, qui augmente la régularité d'eau et rapproche le coefficient d'uniformité vers les normes internationales.

II. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIE

A. Solutions Technologiques Pour L'uniformité D'arrosage

Les trois configurations d'espacement des asperseurs les plus couramment utilisées pour l'arrosage régulier le long du pivot central d'irrigation sont :

1) *Espacement uniforme*: des asperseurs entre 3 et 12 m entre les pulvérisateurs ou les sprinklers le long du latéral, avec leur décharge augmentant en direct

