

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Énergies Renouvelables en Mécanique

Par :

BEKRIT Leila & MESLI Zohra

Sujet

Étude Et Dimensionnement D'une Centrale Photovoltaïque Pour Une Autoconsommation Dans Le Secteur Agricole (Cas De Tlemcen)

Soutenu publiquement, le 26 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. BENMANSOUR. A

MCA

Université de Tlemcen

Président

M. SARI HASSOUN. Z

MCA

Université de Tlemcen

Examinateur

M. SELADJI. C

Professeur

Université de Tlemcen

Encadreur

Année universitaire : **2021 / 2022**

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Au second lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Professeur **SELADJI Chakib**, pour son suivi et pour son énorme soutien qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période de ce mémoire. Ses conseils pertinents avec écoute, amabilité ont permis à notre travail d'aboutir et de voir le jour.

Nous adressons aussi nos remerciements à monsieur **SARI HASSOUN Zakaria**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'il a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et l'enrichir par ses propositions.

Nous remercions vivement monsieur **BENMANSOUR Abdelkrim**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour avoir accepté la rude tâche d'être Président de notre jury. Nous en sommes très honorées.

Nous tenons à adresser nos expressions de remerciements et de respect les plus distinguées à monsieur **FERROUANI Ahmed**, Directeur Gérant de l'EPE/EURL Ferme BELAIDOUNI Mohamed qui n'a ménagé aucun effort pour nous ouvrir les portes de la ferme et qu'il a mis à notre disposition les données dont nous avons besoins.

Nos vifs remerciements et reconnaissances vont aux messieurs **TERKI HASSAINE Taha El-Amine** et **BENADDA Lotfi** pour leurs appuis scientifiques et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos remerciements sincères vont aussi au personnel du groupe KHERBOUCHE, en particulier messieurs **SENOUSSI Mohammed** et **KHERBOUCHE Zakarya** pour leurs générosités et leurs aides à la réalisation de ce travail. Nous vous en sommes profondément reconnaissantes.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants (es) du Département de Génie Mécanique de l'Université de Tlemcen durant nos années d'études.

Enfin, nous remercions messieurs **ABOURA Réda**, **BELKHOUAN Mohamed**, et tous ceux qui nous ont aidé à accomplir notre travail, de près comme de loin.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond
amour :*

*À ma famille qui m'a élevé avec une éducation digne.
Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*À Lila, ma chère amie avant d'être mon binôme, pour
ce qu'elle a fait pour la réussite de ce mémoire.*

À tous mes chers collègues et amis.

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour
que ce travail soit possible.*

Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Zahra

Dédicaces

Je dédie ce travail par gratitude, respect, profonde gratitude et grand amour.

À ma chère mère et à mon cher père, il n'y a pas d'hommage à la transcendance de l'amour dont ils me couvrent encore, avec toute mon infinie gratitude envers eux. Leur patience, leurs encouragements constants, leur grande aide et leurs énormes sacrifices. Que Dieu les préserve et bénisse leur santé.

À toutes mes frères Abd Sammed et Riad, qui ont toujours été une source d'encouragement.

À toute ma famille et mes proches, en particulier mon oncle Djalol, qui m'a beaucoup aidé moralement et matériellement.

Aux âmes de mes chers grands-parents avec qui je serai heureux de participer à cet événement. J'espère être à la hauteur des valeurs qu'ils m'ont inculquées. Dieu les bénisse.

À mon binôme Zahra

Je le dédie aussi à tous mes professeurs, et à tous mes amis.

BEKRIT Leila

ملخص

إن توفر موارد الطاقة المتجددة بكثرة في الجزائر يجعل من استخدام الطاقة الشمسية في القطاع الزراعي حلاً واعداً لتزويد الكهرباء إلى المزارع، على الرغم من الوضع الطاقوي الذي يتميز بالاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري، فضلاً عن التحديات التي تعوق تنمية الطاقات المتجددة.

تهدف دراستنا إلى ادماج الطاقة الكهروضوئية في المزارع. كما تقدم دراسة تصميم لتركيبة كهروضوئية مستقلة لضخ المياه في مزرعة في ولاية تلمسان، بهدف إجراء تقييم تقني وتحليل للربحية الاقتصادية للمشروع باستخدام برنامج PVsyst.

تتميز نتائج دراستنا بعائد استثمار يبلغ 8.4 سنة، وهو ما يمثل حالة مربحة اقتصادياً، خاصة إذا اعتبرنا أن عمر التركيب يتجاوز 25 عامًا.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية - التركيب الكهروضوئي - المزرعة الزراعية المستقلة - الضخ الشمسي - برنامج PVsyst.

Résumé

La disponibilité abondante des ressources énergétiques renouvelables en Algérie rend l'application de l'énergie solaire dans le secteur agricole une solution prometteuse pour l'alimentation en électricité des fermes, malgré la situation énergétique qui se caractérise par la forte dépendance aux énergies fossiles, ainsi que les enjeux qui entravent le développement des énergies renouvelables.

Notre étude a fait le point sur l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les exploitations agricoles. Elle présente également une étude de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour le pompage de l'eau dans une ferme agricole au niveau de la wilaya de Tlemcen, dont l'objectif est de faire une évaluation technique et une analyse de rentabilité économique du projet à l'aide du logiciel PVsyst.

Les résultats issus de notre étude se caractérisent par un retour sur investissement de 8.4 ans, ce qui représente une situation économiquement rentable, surtout, si l'on considère que la durée de vie de l'installation dépassant les 25 ans.

Mots clés : énergie solaire – installation photovoltaïque - ferme agricole autonome - pompage solaire – logiciel PVsyst.

Abstract

The abundant availability of renewable energy resources in Algeria makes the application of solar energy in the agricultural sector a promising solution for the supply of electricity to farms, despite the energy situation that is characterized by heavy dependence on fossil fuels, as well as the challenges that hinder the development of renewable energy.

Our study has reviewed the integration of photovoltaic energy in farms. It also presents a sizing study of an autonomous photovoltaic installation for water pumping in an agricultural farm in the wilaya of Tlemcen, whose objective is to make a technical evaluation and an economic profitability analysis of the project using the PVsyst software.

The results of our study are characterized by a return on investment of 8.4 years, which represents an economically profitable situation, especially if we consider that the life of the installation exceeds 25 years.

Key words : solar energy - photovoltaic installation - autonomous agricultural farm - solar pumping - PVsyst software.

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	vi
Table des matières	viii
Liste des abréviations	xi
Nomenclature	xi
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xv
Introduction générale	1
Chapitre I : Situation énergétique en Algérie	3
I Introduction.....	4
I.1 Paysage énergétique algérien.....	4
I.1.1 Production nationale d'énergie	5
I.1.2 Consommation énergétique en Algérie	7
I.1.3 Consommation électrique en Algérie	7
I.2 Évolution des dépenses d'énergie dans le secteur agricole algérien.....	8
I.2.1 Profil de l'énergie consommée par secteur agricole.....	9
I.3 Raisons d'intérêt pour une modification du système énergétique	12
I.3.1 Statistiques nationales relatives aux gaz à effet de serre	13
I.3.2 Émissions de gaz dans le secteur de l'agriculture	14
I.4 Développement des énergies renouvelables en Algérie et mesures d'accompagnement nécessaires à la diffusion et au développement de son usage	15
I.4.1 Ressources d'énergie renouvelables en Algérie	15
I.5 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie, malgré sa possession d'énergies traditionnelles	18
I.5.1 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau local	18
I.5.2 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau international.....	19
I.6 Programme de développement des énergies renouvelables.....	20
I.6.1 Obstacles à l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables en Algérie. .	21
I.6.2 Les énergies renouvelables dans les exploitations agricoles	21
I Conclusion	22

Chapitre II : État de l’art technologique dans le secteur agricole.....	24
II Introduction	25
II.1 Système solaire photovoltaïque	25
II.1.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau	25
II.1.2 Systèmes photovoltaïques autonomes	27
II.1.3 Systèmes photovoltaïques hybrides	29
II.2 Composants des systèmes solaires photovoltaïques.....	30
II.2.1 Panneaux photovoltaïques	30
II.2.2 Batteries	42
II.2.3 Régulateur de charge	46
II.2.4 Ondulateur	47
II.3 Applications de l’énergie solaire dans le secteur agricole.....	48
II.3.1 Machines solaires de pulvérisation et de semis	48
II.3.2 Tracteurs à énergie solaire	48
II.3.3 Séchoir solaire.....	49
II.3.4 Alimentation en électricité par énergie photovoltaïque.....	50
II.3.5 Chauffage de l'eau et des locaux	50
II.3.6 Serres solaires	50
II.3.7 Pompage solaire	51
II.4 Optimisation du système photovoltaïque dans une ferme agricole.....	56
II.4.1 Agrivoltaïsme.....	56
II.4.2 Tracker solaire.....	58
II.4.3 Panneaux photovoltaïques munis d’un réflecteur solaire	59
II.4.4 Domotique solaire photovoltaïque agricole.....	60
II Conclusion.....	61
Chapitre III : Étude et dimensionnement d’une installation photovoltaïque dans le secteur agricole.....	62
III Introduction	63
III.1 Présentation du logiciel PVsyst.....	63
III.1.1 Dimensionnement d’une installation du pompage solaire à l’aide du logiciel PVsyst V6.7	64
III.2 Présentation de la ferme étudiée : L’EURL BELAIDOUNI Mohamed.....	79
III.2.1 Ressources en eau utilisées	81
III.2.2 Le réseau d’irrigation	81
III.2.3 Système de pompage	82
III.3 Dimensionnement de l’installation du pompage photovoltaïque au niveau de la ferme BELAIDOUNI	82
III.3.1 Dimensionnement des installations du pompage solaire du premier scénario	83

III.3.2	Dimensionnement des installations du pompage solaire du deuxième scénario	94
III.3.3	Dimensionnement des installations du pompage solaire du troisième scénario	98
III.4	Évaluation économique de l'installation du pompage photovoltaïque au niveau de la ferme BELAIDOUNI	103
III.4.1	La durée de vie.....	103
III.4.2	L'investissement initial	103
III.4.3	Étude économique comparative Photovoltaïque / diesel.....	108
III	Conclusion.....	109
	Conclusion générale	110
	Références bibliographiques	110
	Annexes	110

Liste des abréviations

AC : Courant alternative
CC : Courant continu
GPL : Gaz de pétrole liquéfié
GWh : Giga watt heure
MW : Méga watts
Mtep : Million de tonne équivalent de pétrole
N : Nombre d'années pour amortir
OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole
PV : Photovoltaïque
PVsys : Logiciel d'étude et de simulation de systèmes photovoltaïques
Sonelgaz : Société Nationale d'Electricité et de Gaz
SAU : Surface agricole utile
TTCR : Le taillis très courte rotation
Tep-CO₂ : Tonne équivalent de pétrole de gaz CO₂

Nomenclature

HMT : Hauteur manométrique[m]
Hg : Hauteur piézométrique.....[m]
 Δh : Pertes de charge régulière[m]
 λ : Coefficient de perte de charge
V : Vitesse moyenne d'écoulement à l'intérieur du canal[m/s]
L : Longueur du canal[m]
D : Diamètre intérieur du canal[m]
g : Pesanteur.....[m/s²]
Q : Débit à l'intérieur du canal[m³/s]
S : Section intérieure du canal[m²]
Re : Reynolds

Liste des figures

N°	Intitulé de la figure	Page
Chapitre I		
I.1	Production nationale d'énergie primaire de (2010 à 2019) en ktep	5
I.2	Structure de la production d'énergie primaire (%)	6
I.3	Consommation nationale d'électricité (2010-2019).	7
I.4	Consommation du pétrole par secteur en 2019	8
I.5	Consommation d'énergie par produit.	9
I.6	Consommation d'énergie du secteur de l'élevage algérien	10
I.7	Consommation énergétique par filière de culture en Algérie	12
I.8	Émission des gaz à effet de serre en Algérie	14
I.9	Gisement solaire de l'Algérie	15
I.10	Gisement éolien de l'Algérie : Distribution de la vitesse moyenne (m/s) du vent sur le territoire Algérien à 80 m de hauteur	16
Chapitre II		
II.1	Exemple d'un système photovoltaïque à injection totale	26
II.2	Exemple d'un système photovoltaïque à injection du surplus	27
II.3	Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil)	28
II.4	Installation d'un système hybride (couplage PV /générateurs diesel) avec stockage	29
II.5	Installation d'un système hybride (couplage PV /générateurs diesel) sans stockage	30
II.6	Principe de l'effet photovoltaïque	31
II.7	Cellules photovoltaïques classiques	32
II.8	Panneau photovoltaïque Bi-verre	32
II.9	Principe de fonctionnement du panneau photovoltaïque Bi-facial	33
II.10	Cellule solaire en Pérovskite	34
II.11	Cellule solaire organique	35
II.12	Fonctionnement du panneau solaire aérovoltaïque	36
II.13	Panneau solaire hybride	36
II.14	Panneau photovoltaïque en couches minces	37
II.15	Panneau photovoltaïque avec Micro-onduleur intégré	38
II.16	Comparaison entre cellules classiques et cellules « Back contact »	38
II.17	Comparaison entre cellules classiques et cellules MBB	39
II.18	Panneaux photovoltaïques optique-solaires	39
II.19	Cellule anti-solaire	40
II.20	Panneaux photovoltaïques Insolight	40
II.21	Tuiles solaires	41
II.22	Panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments	41
II.23	Panneaux photovoltaïques flottants	42
II.24	Structure de la batterie	43
II.25	Pulvérisateur agricole à énergie solaire	48
II.26	Tracteur à énergie solaire	49
II.27	Séchoir solaire	49
II.28	Serre agricole avec panneaux solaires semi-transparents	50

II.29	Pompage solaire dans une ferme agricole	51
II.30	Composants d'un système de pompage solaire	52
II.31	Pompe centrifuge et pompe volumétrique	53
II.32	Comparaison de l'efficacité de l'agriculture traditionnelle par rapport à l'agrivoltaïsme	56
II.33	Préservations des cultures avec une installation agrivoltaïque	57
II.34	Panneaux photovoltaïques à réflecteur solaire	60
Chapitre III		
III.1	Sections du logiciel PVsyst V6.7	64
III.2	Conception d'un projet du pompage solaire dans le logiciel PVsyst V6.7	65
III.3	Définition du nom du fichier et du nom du projet	66
III.4	Définition du site du projet	66
III.5	Identification du site du projet sur la liste des sites prédéfinis	67
III.6	Identification d'un site indéfini sur la liste des sites géographiques prédéfinis	67
III.7	Identification du lieu et des coordonnées géographiques du site du projet	68
III.8	Enregistrement du fichier du site du projet	68
III.9	Enregistrement du fichier du projet	68
III.10	Orientation des panneaux photovoltaïques	69
III.11	Identification des différents paramètres pour l'orientation des panneaux photovoltaïques	70
III.12	Graphes du facteur de transposition en fonction de l'inclinaison et de l'orientation du plan	70
III.13	Définitions des besoins en eau	71
III.14	Identification du circuit hydraulique du pompage	72
III.15	Identification des besoins en eau et pression	73
III.16	Définition des caractéristiques du système du pompage photovoltaïque	73
III.17	Identification des caractéristiques de la pompe	74
III.18	Conception du sous-champ	75
III.19	Lancement de la simulation et exécution du rapport de la simulation	75
III.20	Bilans et principaux résultats du rapport de simulation	76
III.21	Diagramme des pertes sur l'année entière	77
III.22	Exécution de l'évaluation économique	78
III.23	Analyse et évaluation économique du projet dans le logiciel PVsyst V6.7	78
III.24	Analyse et évaluation économique du projet dans le logiciel PVsyst V6.8	79
III.25	Site géographique de la ferme BELAIDOUNI	80
III.26	Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du premier scénario	83
III.27	Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	84
III.28	Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	84
III.29	Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	85
III.30	Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	85
III.31	Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	86
III.32	Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	88
III.33	Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	88

III.34	Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	89
III.35	Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	89
III.36	Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	90
III.37	Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du deuxième scénario	94
III.38	Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	95
III.39	Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	95
III.40	Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	96
III.41	Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	96
III.42	Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	97
III.43	Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du troisième scénario	99
III.44	Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	99
III.45	Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	100
III.46	Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	100
III.47	Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	101
III.48	Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	101
III.49	Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	104
III.50	Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	104
III.51	Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	106
III.52	Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	107

Liste des tableaux

N°	Intitulé du tableau	Page
Chapitre I		
I.1	Production nationale d'électricité (2012-2019)	7
I.2	Superficie de plancher recommandée pour différents types de luminaire pour les étables laitières	11
I.3	Indice de rendu des couleurs des principales sources d'éclairage	11
I.4	Émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole	14
Chapitre II		
II.1	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques Bi-verre	32
II.2	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques Bi-faciaux	33
II.3	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques en Pérovskite	34
II.4	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques organiques	35
II.5	Avantages et inconvénients des panneaux solaires aérovoltaïques	35
II.6	Avantages et inconvénients des panneaux solaires hybrides	36
II.7	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques en couches minces	37
II.8	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques avec Micro-onduleur intégré	37
II.9	Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques « Back Contact ».	38
II.10	Avantages et inconvénients des tuiles solaires	41
II.11	Avantages et inconvénients de la batterie à plomb ouvert	43
II.12	Avantages et inconvénients de la batterie AGM	44
II.13	Avantages et inconvénients de la batterie en gel	44
II.14	Avantages et inconvénients de la batterie au lithium-ion	45
Chapitre III		
III.1	Occupation superficielle des différentes cultures de la ferme	80
III.2	Besoins en eau de la viticulture en irrigation par aspersion	81
III.3	Consommation du gasoil pour les pompes d'irrigation	82
III.4	Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1	87
III.5	Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2	91
III.6	Les caractéristiques de la pompe à eau du bassin 2 vers la parcelle 2	93
III.7	Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3	98
III.8	Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3	102
III.9	Devis estimatif de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2A	105
III.10	Comparaison des prix des scénarios proposés	107
III.11	Le cout du carburant consommé par la ferme	108

*Introduction
générale*

Introduction générale

L'énergie, vecteur primordiale du développement économique et social reçoit une attention particulière de la part des gouvernements. Sa grande différence dans sa répartition entre les pays développés du Nord et les pays en développement du Sud, crée souvent des tensions entre ces derniers.

L'Algérie, dotée d'un grand potentiel énergétique fossile, se retrouve en phase de déplétion de son potentiel accusant ainsi un déséquilibre croissant au sein du marché intérieur entre l'offre et la demande. À ce titre, et dans la perspective d'une transition énergétique en faveur d'un développement durable, des programmes très ambitieux sont lancés par le gouvernement algérien en faveur de son potentiel énergétique renouvelable à l'instar du solaire, l'éolien, la géothermie et la biomasse. Plusieurs secteurs se retrouvent au cœur de cette transformation énergétique comprenant le secteur agricole, en raison de son importance pour la sécurité alimentaire. À ce propos, l'état algérien a tenté ces dernières années d'inciter les agriculteurs, par le biais de subventions, à utiliser les technologies des énergies renouvelables afin de créer un équilibre délicat entre la productivité des cultures et le maintien de la stabilité économique, tout en minimisant l'utilisation de ressources fossiles limitées et leurs impacts environnementaux négatifs.

Ce Mémoire aborde spécifiquement les aspects technico-économiques d'une solution de pompage d'eau utilisant une source d'énergie solaire photovoltaïque. Un cas concret, en l'occurrence la ferme pilote BELAIDOUNI a fait l'objet d'une analyse comparative avec les méthodes traditionnelles appliquées à ce jour pour en tirer les conclusions quant à la rentabilité du système proposé. Afin de structurer ce travail de façon harmonieuse plusieurs chapitres ont été identifiés.

Dans le premier chapitre, nous avons analysé la situation énergétique en Algérie, en nous concentrant sur les grandes quantités d'énergie consommées, notamment dans le secteur agricole, puis nous avons évoqué les mesures prises pour faire évoluer le système énergétique vers les énergies renouvelables. Nous avons également étudié les possibilités de l'efficacité de ce type d'énergie en Algérie et son utilisation dans le domaine agricole.

Dans le deuxième chapitre, notre étude s'est davantage concentrée sur la technologie de l'énergie photovoltaïque dans le domaine agricole, où nous avons discuté en détail du système solaire électrique avec tous ses éléments et la technologie qu'il a touchée dans la période récente. Puis nous avons évoqué les utilisations de cette énergie dans des appareils liés au domaine agricole

Dans le troisième chapitre, nous avons consacré notre étude au dimensionnement, où nous avons présenté le programme PVsys, qui nous a permis d'identifier les éléments du système de pompage photovoltaïque. Puis nous avons présenté le problème énergétique de la ferme BELAIDONI, qui souffre d'un pourcentage élevé de consommation d'énergie, et nous avons également proposé des solutions pour les énergies renouvelables, que nous avons étudié via le logiciel PVsys, et enfin nous avons comparé la solution énergétique adaptative à la situation énergétique actuelle de la ferme.

Enfin, une conclusion générale couronne ce travail, à travers laquelle des résultats et des perspectives sont mis en relief pour une meilleure prise en charge des problèmes de même nature.

Chapitre I

*Situation énergétique
en Algérie*

I Introduction

La conservation de l'énergie ne fait pas partie des choses qui préoccupent les gens dans leur vie quotidienne, mais c'est sans aucun doute un sujet très important, nous utilisons tous de l'énergie toute la journée, toute l'année, tout en oubliant que l'énergie n'est pas disponible éternellement.

L'une des sources d'énergie les plus importantes utilisées aujourd'hui, qui contribue à 99% de l'énergie utilisée aujourd'hui, est connue sous le nom d'énergie fossile, qui est progressivement consommée et disparaît en raison de son utilisation; Charbon, pétrole et gaz naturel conventionnel, et parce qu'ils sont des sources épuisables et causent des problèmes de pollution de l'environnement, il existe des recherches approfondies pour fournir et développer des sources d'énergie renouvelables et alternatives, qui sont d'une grande importance en tant que ressource naturelle permanente.

Dans cette partie, notre étude portera sur le secteur énergétique actuel en Algérie, en particulier dans le domaine agricole. Nous passerons à une étude de cas sur les énergies renouvelables et une politique définie par l'Algérie pour la transition énergétique.

I.1 Paysage énergétique algérien actuel

Les ressources naturelles algériennes sont importantes et diversifiées. Elle possède la dixième plus grande réserve de gaz naturel au monde et en Afrique après le Nigeria, et des réserves de pétrole à la troisième place en Afrique, après la Libye et le Nigeria et la 15^e au monde, en plus de plusieurs autres ressources (zinc, phosphate, fer, or, uranium...etc.).[1]

Cette énergie fossile, ayant un caractère non renouvelable et polluant, nécessite l'option d'une politique énergétique qui permette de changer notre comportement de production et de consommation vers un modèle plus propre et plus durable.[2]

À cette fin, nous devons suivre un processus qui assurera la sécurité énergétique à moyen et à long terme, par l'utilisation d'un mix énergétique composé principalement d'énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon) et d'énergies renouvelables de ses différentes natures (solaire, éolien, hydraulique, biomasse, etc.).

I.1.1 Production nationale d'énergie

Dans cette partie, les données relatives à la production et à la consommation d'énergie sont extraites des bilans de l'énergie publiés par le ministère de l'Énergie.

I.1.1.1 Production d'énergie primaire

Le bilan de la production commerciale d'énergie primaire ces dernières années a enregistré une quasi-stabilité (-3.1 %) par rapport aux réalisations de 2010, pour atteindre 157,7 Mtep.[3] Ainsi, la hausse de production du gaz naturel a compensé partiellement la baisse de production des liquides (pétrole et GPL) en raison notamment de l'application de l'accord de réduction de production de l'OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole) pour l'Algérie, 145 000 barils par jour doivent être réduits pour l'année 2022).[4]

Cette baisse a également touché tous les produits sauf l'électricité primaire qui a fortement augmenté avec l'entrée en production de la centrale hybride de Hassi R'Mel (d'une capacité de 150 MW dont 25 MW de solaire) et La production d'électricité à partir de l'énergie solaire était de 124 GWh (y compris la production des villages solaires) en 2010. Ainsi, la production primaire d'électricité est passée à 835 GWh en 2019, tirée par une hausse (+30%) de la production du secteur hydraulique après des pluies favorables en 2019.[3]

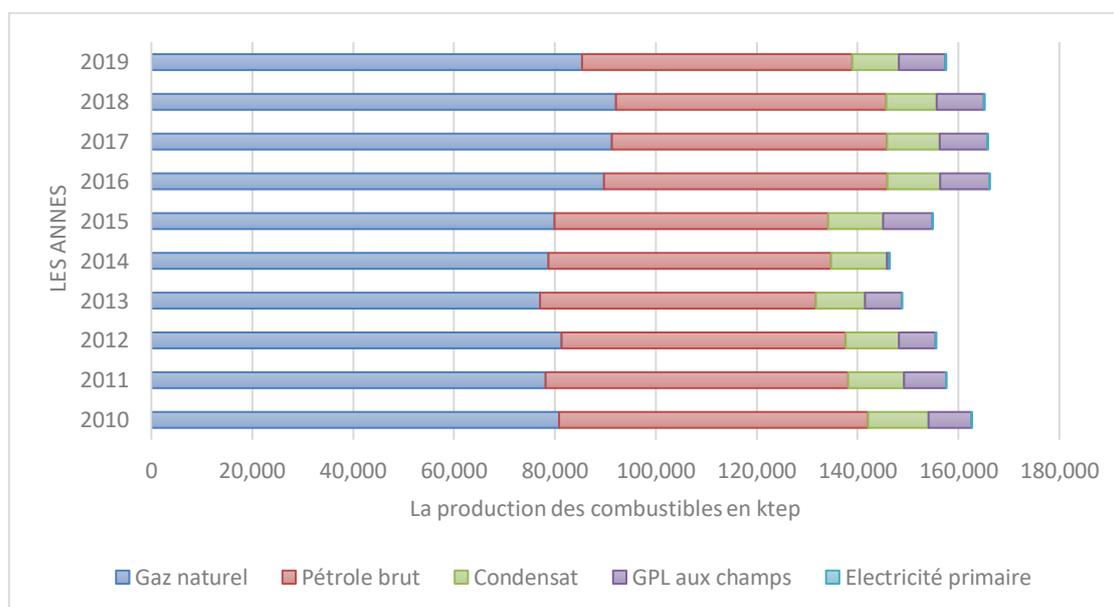


Fig.I.1 : Production nationale d'énergie primaire de (2010 à 2019) en ktep [2].

La fig.I.1 montre la production nationale d'énergie primaire et nous constatons une augmentation de la production nationale d'énergie de 2010 à 2019.

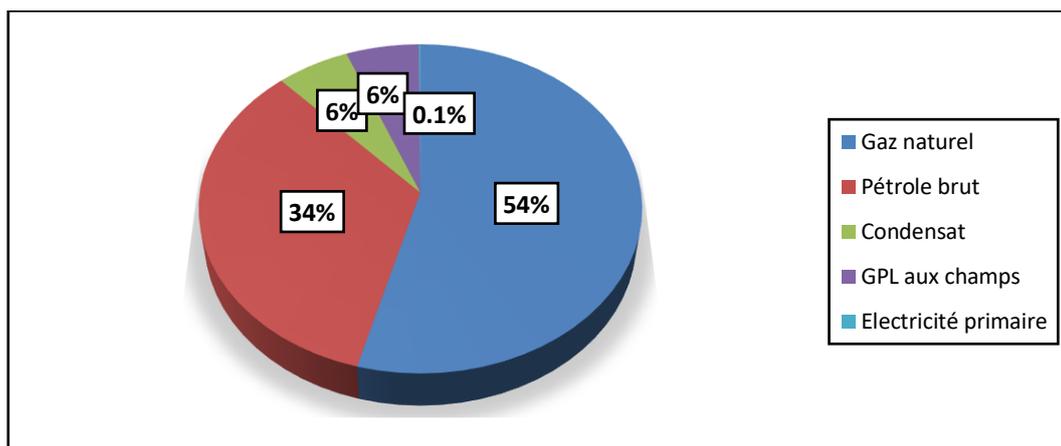


Fig.I.2 : Structure de la production d'énergie primaire (%). [2]

La fig.I.2 montre le pourcentage d'énergie primaire en 2019 qui a été produite lorsque le gaz naturel domine le taux de la production avec 54 %, suivi par le pétrole brut (34%), tandis que la part du condensat et le GPL sont faibles. La production à partir de sources renouvelables, est très faible représentée par la production d'électricité primaire à partir de sources hydroélectriques et solaires (0,1%) dans le mix énergétique national. Il ressort de cette figure que plus de 99% de la production nationale d'énergie est basée sur les combustibles fossiles avec une augmentation sensible de la production de gaz naturel au détriment des autres sources avec une faible production d'électricité primaire.

Les quantités d'énergie primaire transférées au cours de l'année 2019 ont connu une augmentation (+1,2%) par rapport aux années précédentes pour atteindre 67,2 millions de tonnes, dont 2,2% d'augmentation des prélèvements de gaz naturel pour les besoins de la centrale électrique (Sonelgaz et auto- producteurs) à 18,3 millions de tonnes.[2]

I.1.1.2 La production de l'énergie électrique

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99,2%) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0,8%) et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré cette année 389 GWh, soit 0,7% du total, et les filières solaires photovoltaïque (11 GWh) et thermodynamique (58 GWh) qui représentent quant à elles 0,1 % du bilan.[4]

La production d'électricité renouvelable a fortement baissé de 2012 à 2015, passant de 622 à 223 GWh, selon le bilan national d'énergie (2016), qui peut s'expliquer par la réduction de la production hydroélectrique. En 2016 elle a récupéré son augmentation progressivement pour atteindre 835 GWh en 2019, provenant d'une hausse de la production de la filière hydraulique à la suite d'une pluviométrie favorable en 2019. Par ailleurs, la production d'électricité thermique a augmenté régulièrement de 2012 à 2019. Passant de 56776 à 80691 GWh.[5].

Tab.I.1 : Production nationale d'électricité (2012-2019).[6]

Les années	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Électricité fossile thermique (GWh)	56776	59447	63988	68575	70661	75382	75880	80691
Électricité renouvelable (GWh)	622	330	254	223	336	635	783	835

I.1.2 Consommation énergétique en Algérie

Le rapport à mi-parcours (2010-2019) montre que la consommation d'énergie finale continue de suivre une tendance à la hausse avec une moyenne annuelle de 5% et que cette évolution de la consommation d'énergie au cours de la même période (2010-2019) a enregistré une forte augmentation de 59 %.[5]

En ce qui concerne la répartition de la consommation finale par produit, on note une part importante du gaz naturel (34%), suivi des produits pétroliers (32%) et de l'électricité (28%).[7]

I.1.3 Consommation électrique en Algérie

Dans l'ensemble la consommation d'énergie primaire au pays est passée de 45 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2010 à 81 millions de tep en 2019. Une revue des bilans énergétiques entre 2010 et 2019 sur la consommation d'énergie finale a montré qu'un total de 650 millions de tep de consommations d'énergie électriques a été consommé pendant les dix ans.

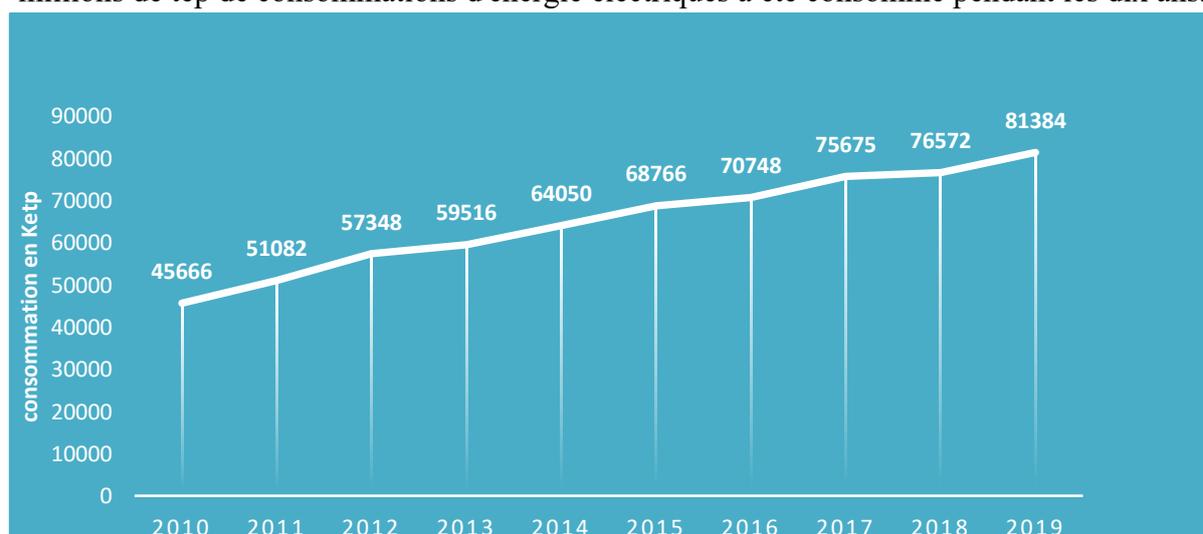


Fig.I.3 : Consommation nationale d'électricité (2010-2019).[6]

La consommation était d'environ 90 Mtep dans l'industrie et la construction, soit 23% de la consommation totale, 142 Mtep dans les transports, soit 30% et 177 Mtep dans les secteurs résidentiels et tertiaire, soit 47%. [6]

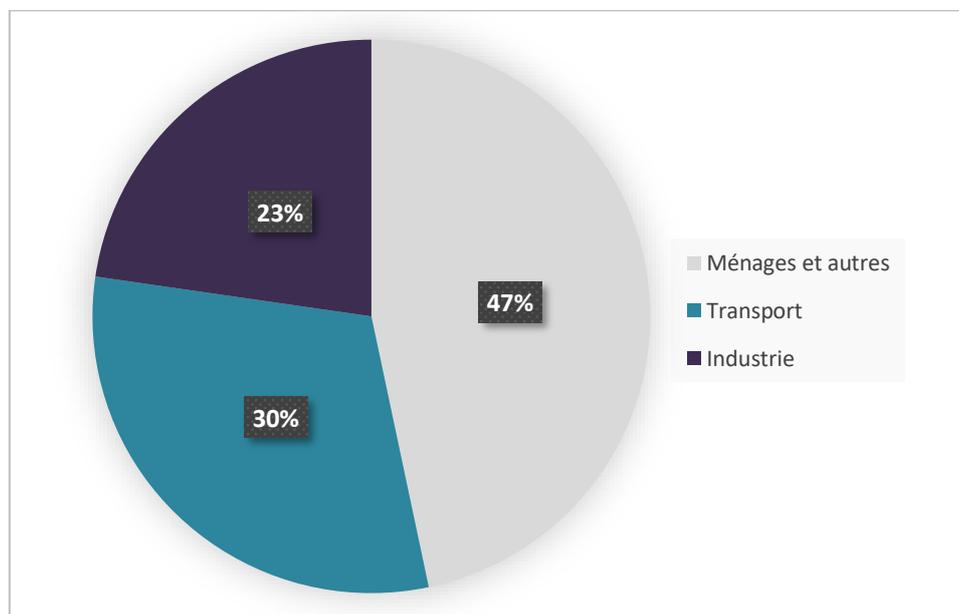


Fig.I.4 : Consommation du pétrole par secteur en 2019. [6]

I.2 Évolution des dépenses d'énergie dans le secteur agricole algérien

Les terres utilisées pour l'agriculture occupent environ 21% de la superficie totale du pays, Elle est estimée à environ 49 millions d'hectares répartis comme suit : 8,4 millions d'hectares de surface agricoles utiles (SAU), dont une tierce propriété de l'État, dont 7,5 millions d'hectares dédiés aux cultures annuelles et environ 1 million d'hectares dédiés aux cultures pérennes ; 6,6 millions d'hectares de forêts de luzerne et de steppes. Enfin, les terres irriguées, d'une superficie de 929 000 hectares, représentent 11 % de la superficie de la SAU. [9]

Comme tout secteur économique, l'agriculture a besoin d'énergie pour augmenter et améliorer sa productivité, et surtout pour faire face aux problèmes climatiques, comme son besoin d'énergie pour être utilisée dans les serres et son besoin de carburant pour les pompes.

La consommation d'énergie directe de l'agriculture algérienne augmente lentement. Elle est passée de 920 Mtep en 2010 à 1200 Mtep en 2020. [9][10] donc moins de 0,74% de la consommation énergétique nationale. [6]

Cette augmentation comprenait tous les types d'énergie consommée, en particulier une forte consommation de carburant et d'électricité.

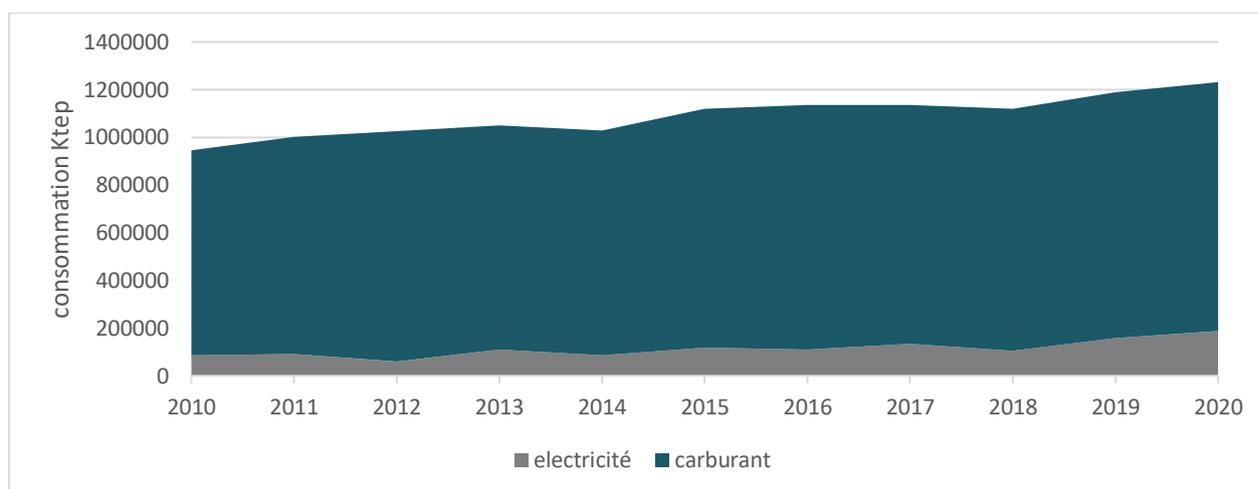


Fig.I.5 : Consommation d'énergie par produit. [Annexe 1]

- **Le carburant est l'énergie la plus utilisée**

De grandes quantités de carburant sont nécessaires aux grandes cultures et aux pratiques agricoles (labourage, ensemencement, fertilisation, application de produits phytosanitaires). Ces activités représentent à elles seules un quart de la consommation de l'agriculture.

- **L'électricité, une composante du coût important pour l'irrigation, les bâtiments et l'élevage**

Le processus d'irrigation des cultures est celui qui consomme le plus d'électricité, car il prend plusieurs heures par jour et se répète plusieurs fois par mois, en plus de l'éclairage nécessaire aux bâtiments d'élevage.

- Ces statistiques officielles ne font pas mention de la consommation de sources d'énergie renouvelables.

I.2.1 Profil de l'énergie consommée par secteur agricole

Cette partie dresse un profil de la consommation d'énergie de chaque secteur choisi pour l'étude, c'est-à-dire l'élevage et les cultures agricoles.

I.2.1.1 Les élevages

I.2.1.1.1 Consommation d'énergie

Le secteur de l'élevage algérien s'est développé au cours des dernières années pour suivre la croissance des consommateurs finaux. L'expansion de ce secteur a coïncidé avec une augmentation de la consommation d'énergie pour répondre à ses besoins.

La figure I.6 montre la consommation d'énergie dans le secteur de l'élevage entre 2010 et 2020. Cette dernière a été divisée en une première phase de 2010 à 2018, qui a défini une consommation irrégulière, mais elle est encore relativement élevée et cela peut s'expliquer par le développement

de secteur de l'élevage et cela s'explique également par l'inefficacité dans l'utilisation de l'énergie, suivie par la dernière étape, qui a connu une consommation énorme en raison de l'expansion de ce domaine pour suivre le rythme de la demande, Il utilise également des techniques technologiques pour la gestion agricole, la direction et le contrôle des équipements automatisés.

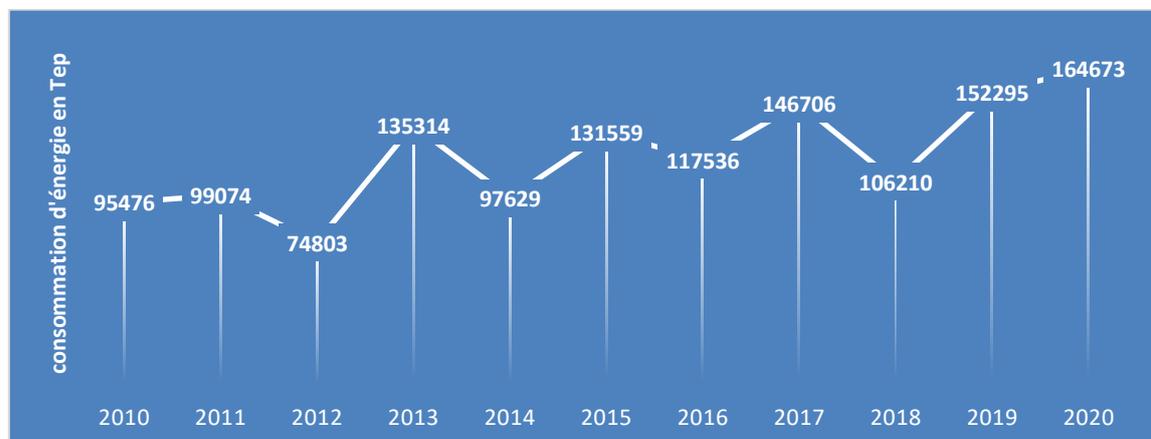


Fig.I.6 : Consommation d'énergie du secteur de l'élevage algérien. [Annexe 2]

▪ Éclairage

Le domaine agricole dépend de l'électricité car un bon système d'éclairage est essentiel dans les granges. Afin de faciliter le travail du produit, il offre plus de sécurité et d'efficacité dans diverses tâches et améliore la qualité environnementale globale.

Par exemple, pour l'élevage des bovins, les recherches indiquent que 108 à 215 lux (10 à 20 pieds-bougies) de lumière pendant 16 à 18 heures, suivis de 6 à 8 heures d'obscurité, ont les effets suivants : lorsque la lumière est disponible pendant 13 heures, la consommation alimentaire augmente d'environ 6 % ; promotion de la maternité ; Le meilleur développement possible du mollet. [11].

Un bon éclairage dans les étables laitières est important. Ainsi, l'agriculteur doit prendre les bonnes décisions techniques, et à partir de là, dans le tableau I.2, nous résumerons les meilleurs types d'éclairage.

Tab.I.2 : Superficie de plancher recommandée pour différents types de luminaire pour les étables laitières.[11]

Type de lampe	Puissance de la lampe
Fluorescente (Hauteur d'installation de 2,4 à 3,6 m)	32 W - 1 x 1,2 m
	32 W - 2 x 1,2 m
	32 W - 4 x 2,4 m
	86 W - 2 x 2,4 m
Aux halogénures métalliques (réflecteur et réfracteur)	100 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	150 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	250 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	400 W (Hauteur d'installation de 5 m et plus)
Aux halogénures métalliques (réflecteur seulement)	100 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	150 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	250 W (Hauteur d'installation de 3 à 5 m)
	400 W (Hauteur d'installation de 5 m et plus)

Tab.I.3 : Indice de rendu des couleurs des principales sources d'éclairage. [11]

Type de lampe	Température	Rendu des couleurs
Fluorescente LFC	3 500 - 5 000	Bon à excellent
Aux halogénures métalliques	3 700 - 5 000	Bon

Après avoir examiné les différents styles ou types d'éclairage, en tenant compte de l'efficacité, Nous recommandons des lampes fluorescentes à système d'éclairage à tubes ou des lampes aux halogénures métalliques Métal pour l'éclairage des étables laitières.[11]

Le choix entre les deux types du système donc d'éclairage doit être analysé au cas par cas, En fonction de plusieurs facteurs : la hauteur d'installation des lampes, la température de fonctionnement de la lampe, le mode d'éclairage, la réflexion des murs et la disposition des animaux.[11]

I.2.1.2 Les cultures

I.2.1.2.1 La consommation d'énergie

Le graphique ci-dessous montre les valeurs de la consommation d'énergie dans l'agriculture, qui est principalement liée à l'irrigation. Même les années où il pleut beaucoup, l'agriculteur n'a pas besoin d'irriguer les cultures. Cela se reflète dans la figure I.7 qui montre une consommation irrégulière, c'est-à-dire des rendements de consommation en pourcentage des précipitations. La consommation a également augmenté ces dernières années, compte tenu de la sécheresse en Algérie en 2019 et 2020.

Pour le secteur agricole, il a également connu une augmentation de la consommation due au développement et à l'expansion de ce dernier, et cela est illustré par le graphique ci-dessous, qui comprend les valeurs de la consommation d'énergie dans l'agriculture, qui est principalement liée à l'irrigation. Il montre une consommation importante mais irrégulière due aux années de pluie Là où il pleut abondamment, c'est-à-dire que l'agriculteur n'a pas besoin d'irriguer les cultures. On note également la forte consommation ces dernières années, compte tenu de la sécheresse survenue en Algérie en 2019 et 2020.



Fig.I.7 : Consommation énergétique par filière de culture en Algérie. [Annexe 3]

I.3 Raisons d'intérêt pour une modification du système énergétique

Les problèmes liés aux ressources fossiles, nous encouragent à revoir les alternatives au charbon, au pétrole et au gaz naturel, et bien que les sources d'énergie renouvelables ne soient pas aussi disponibles que les sources d'énergie traditionnelles, il existe un large éventail de ressources en Algérie pour investir dans d'autres sources non traditionnelles. Dans cette étude, nous analysons les principaux facteurs qui ont incité l'Algérie à s'intéresser aux énergies renouvelables, notamment :

- Le fait que l'énergie fossile soit classée comme une substance appauvrie : Il existe de nombreuses études et prédictions liées à la question de l'épuisement de l'énergie conventionnelle à l'avenir, et ce problème est un point important qui a poussé de nombreux économistes et penseurs à essayer de trouver une alternative à l'énergie traditionnelle. En Algérie, des prévisions de consommation d'énergie ont été faites pour les années à venir qui admettaient qu'elle suffirait à peine à satisfaire la demande intérieure et les besoins d'exportation d'énergie.
- Deuxièmement, l'énergie conventionnelle est l'une des principales causes de pollution. Là où les lois environnementales tentent d'entraver la consommation et la production d'énergie traditionnelle à l'échelle internationale. L'Algérie tente également de s'appuyer sur des stratégies et des programmes pour faire face aux défis climatiques. Pour contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique, l'Algérie a ratifié en 1993 la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et a adhéré au Protocole de Kyoto en 2005, ce qui marque sa volonté de participer aux efforts internationaux de lutte contre le changement climatique et ses impacts potentiels. Récemment, l'Algérie, par un décret présidentiel signé le jeudi 13 octobre 2016, relatif à l'Accord de Paris sur le climat finalement adopté en 2015, lors de la 21ème Conférence des Parties à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, a publié un résumé que l'Algérie est engagée à cela. Réduire les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 de 7 % par ses propres moyens et de 22 % grâce aux financements internationaux. [12] [13]
- L'Algérie est en mesure d'investir dans le domaine des énergies renouvelables en raison des qualifications et des capacités qu'elle possède qui lui permettent de s'élever et de bénéficier de ce domaine.

I.3.1 Statistiques nationales relatives aux gaz à effet de serre

Les statistiques nationales sur les gaz à effet de serre réalisées dans le cadre du projet ALG/98/G31 qui comprend le projet d'élaboration de la stratégie et du plan d'action nationaux pour faire face au changement climatique en 2000. Ce dernier a montré tous les gaz à effet de serre à impact direct : dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), les hydrofluorocarbures (HFC), les fluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) ainsi que les gaz à effet de serre indirects : oxydes d'azote (NO_x), monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils à l'exception du méthane (COVM) et dioxyde de soufre (SO_2).[14][15]

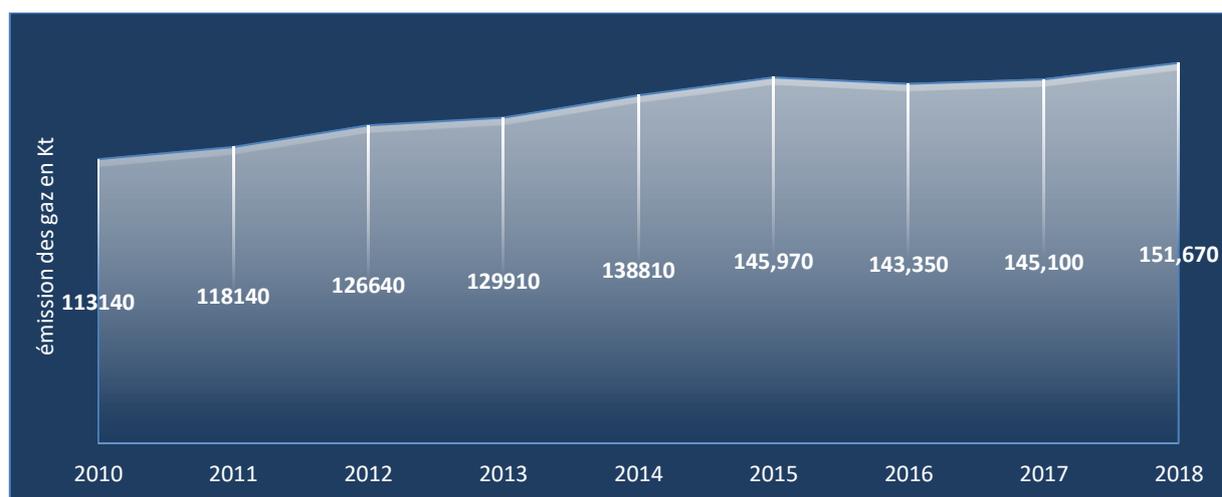


Fig.I.8 : Émission des gaz à effet de serre en Algérie. [16]

La figure I.8 montre les émissions de gaz à effet de serre de 2010 à 2018. Nous notons que les émissions de dioxyde de carbone des secteurs économiques augmentent régulièrement en raison de la conversion et de l'utilisation d'énergie non renouvelable comme produit final.

I.3.2 Émissions de gaz dans le secteur de l'agriculture

Le secteur de l'agriculture est la 3^{ème} source d'émissions de gaz à effet de serre avec 12,038 millions de tonne de TE- CO_2 soit 11,49% du total des émissions brutes. La plus grande part des émissions provient de Protoxyde d'azote N_2O qui représente près des 2/3 des émissions agrégées du secteur agricole. Ceci s'explique par l'utilisation des engrais azotés pour l'enrichissement des sols. Le méthane CH_4 contribue pour 1/3 des émissions de ce secteur et provient des déchets des animaux domestiques.[17]

Tab.I.4. Émissions des gaz à effet de serre dans le secteur agricole. [17]

Combustibles en Mt	CO_2	CH_4	N_2O
Gaz naturel	0,117857143	$1,05042 \cdot 10^{-5}$	$2,10084 \cdot 10^{-7}$
GPL	0,042420168	$3,36134 \cdot 10^{-6}$	$6,72269 \cdot 10^{-8}$
Gasoil	0,049815126	$2,78992 \cdot 10^{-6}$	$1,88235 \cdot 10^{-5}$
Total	0,210092437	$1,66555 \cdot 10^{-5}$	$1,91008 \cdot 10^{-5}$

I.4 Développement des énergies renouvelables en Algérie et mesures d'accompagnement nécessaires à la diffusion et au développement de son usage

Pour suivre le développement des marchés mondiaux de l'énergie, l'Algérie s'est engagée à adopter une nouvelle stratégie énergétique basée sur le développement de son exploitation [17] et afin de dépasser également les exigences et procédures nécessaires et appropriées pour favoriser la diffusion et le développement de ce type d'énergies. Comme encourager la recherche et le développement dans le domaine des énergies propres et publier un ensemble de lois et de mesures incitatives et fiscales.

I.4.1 Ressources d'énergie renouvelables en Algérie

I.4.1.1 Les possibilités du recours à l'énergie solaire en Algérie

L'utilisation de l'énergie solaire en Algérie s'explique notamment par les raisons suivantes :

- L'abondance des terres désertiques ensoleillées pour la plupart de l'année et le soleil s'étendent sur 2000 heures par année ; Le désert algérien est l'un des plus grands déserts du monde et se caractérise par une chaleur extrême, surtout en été, lorsque la température dépasse 60 degrés, et il représente la superficie du désert en Algérie à plus de 80%, ce qui aide pour exploiter davantage l'énergie solaire.[18]

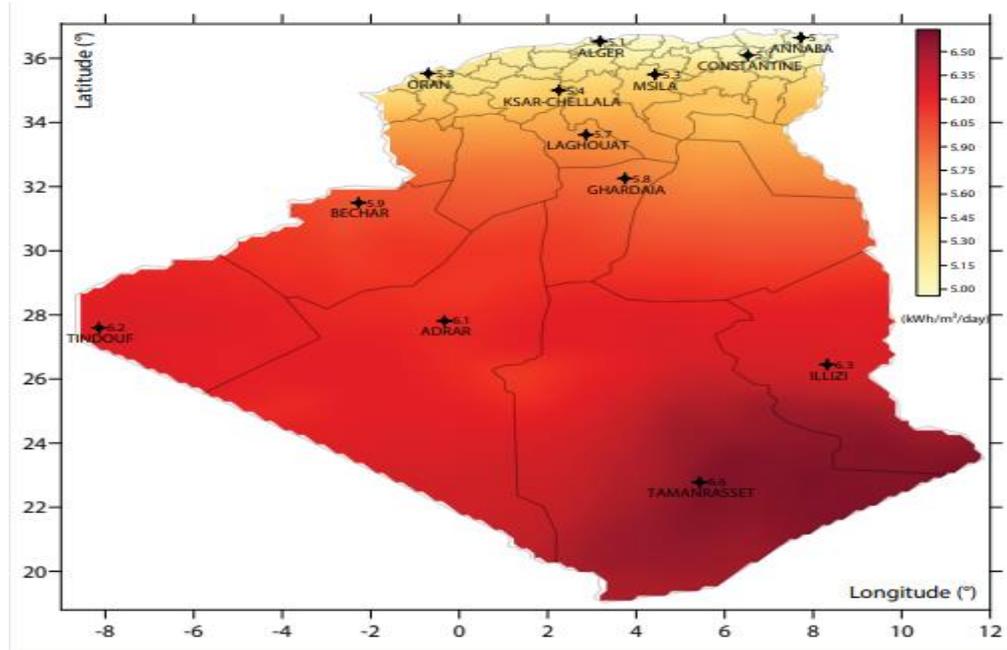


Fig.I.9. Gisement solaire de l'Algérie. [19]

- L'énergie solaire totale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré varie entre 5,1 kWh au nord et 6,5 kWh dans le grand sud (Fig. I.9). Plusieurs études indiquent que l'énergie solaire standard en Algérie lui donne la possibilité d'exporter ce type d'énergie vers d'autres pays.
- En Algérie, il existe de petits groupements villageois dispersés, et il peut être impossible pour des raisons pratiques ou économiques de raccorder ces villages et zones rurales dans certains

cas au réseau électrique principal, donc la solution appropriée dans ce cas est d'exploiter l'énergie solaire dans ces régions éloignées.

I.4.1.2 Les possibilités du recours à l'énergie éolien en Algérie

La détermination du potentiel éolien en Algérie est une priorité, et il existe plusieurs études pour établir des parcs éoliens pour produire de l'électricité en Algérie, et parmi les raisons les plus importantes pour lesquelles l'Algérie se tourne vers ce type d'énergie :

- L'intérêt d'utiliser l'énergie éolienne est qu'elle est économique (4,95 à 9,32 dinars le kilowatt par heure), ce qui la rend moins chère par rapport à l'énergie solaire, car elle s'effectue dans l'atmosphère et n'est pas polluée. [20]
- Il dispose une technologie simple par rapport à d'autres sources d'énergie.
- Se plonger dans l'exploitation des vents est une valeur d'investissement garantie, d'autant plus que l'Algérie considéré pays créatif avec une répression inépuisable des monnaies, il dispose d'un potentiel régional sous une plus grande dimension. Elle possède 1 200 km de côtes et 1 500 km séparant le nord et le sud.
- L'Algérie a une position géographique favorable pour bénéficier de l'énergie, car le vent souffle. L'Algérie doit transporter avec elle beaucoup d'air marin humide, de grandes quantités d'air continental spécial, et quelques identités désertiques et locales avec une vitesse moyenne de plus de 7 mètres par seconde, en particulier dans les zones côtières de plus de cinquante mille kilomètres carrés. [21]

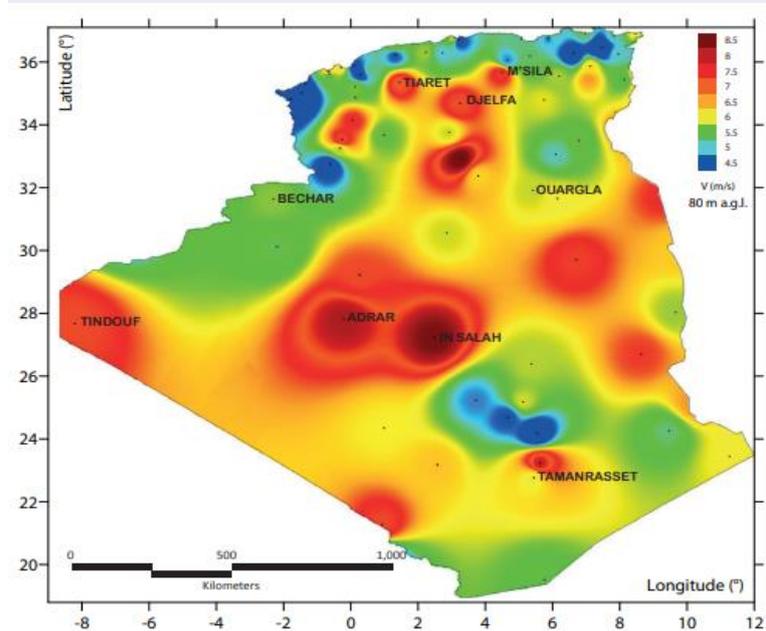


Fig.I.10. Gisement éolien de l'Algérie : Distribution de la vitesse moyenne (m/s) du vent sur le territoire Algérien à 80 m de hauteur. [19]

I.4.1.3 Les possibilités du recours à l'énergie hydroélectrique en Algérie

Les quantités totales de pluie qui tombent sur la région algérienne sont importantes et sont estimées à environ 65 milliards de m³ (par an), mais seul un faible pourcentage, estimé à 5%, est exploité. Mais depuis quelques années, le nombre de jours de pluie a tendance à diminuer, et cette pluie se concentre sur des zones limitées en plus de l'évaporation de cette eau par la chaleur, sans négliger la vitesse de son écoulement vers la mer, ou vers le niveau des eaux souterraines. Les sources d'eau de surface diminuent avec le passage du nord au sud, et la quantité d'eau utile et renouvelable est actuellement estimée à environ 25 milliards de mètres cubes [23].

I.4.1.4 Les possibilités du recours à l'énergie biomasse en Algérie

Les perspectives de développement de cette énergie en Algérie regorgent de déchets d'élevage, de dattes du sud et de déchets de l'industrie de l'huile d'olive, ce qui laisse présager la mise en place de projets de production d'énergie électrique fonctionnant avec des résidus alimentaires secs. À partir des graines d'olive rejetées par l'industrie, la capacité de la centrale électrique sera calculée en fonction de ce qui est disponible dans les combustibles de la biomasse, et dans le cas des résidus de l'industrie de l'huile d'olive, la quantité moyenne de graines ou de céréales rejetées chaque année est estimée Avec 70 000 tonnes en Algérie à ce jour, les déchets secs de l'industrie de l'huile d'olive sont utilisés comme combustible local. Quant aux autres avantages qui ont été mis en avant dans cette énergie, ils sont sociaux, économiques et environnementaux à raison de 3,7 mégatonnes d'équivalent pétrole/an.[24]

I.4.1.5 Potentiels géothermiques en Algérie

La chaleur géothermique de la terre est une source d'énergie renouvelable, et l'exploitation de cette énergie prend un plan d'intérêt à travers le développement des techniques de recherche, d'exploration, et que l'information géologique, géochimique et géophysique permettent le dessin d'une carte "géométrique" préliminaire qui combine plus de 200 sources chaudes dans la région nord du pays, qui peuvent être utilisées pour le chauffage, le séchage agricole, l'élevage et l'industrie agro-alimentaire, et représente un tiers de ces sources minérale, avec des températures dépassant 45°C, tel que Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara. [25]

I.5 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie, malgré sa possession d'énergies traditionnelles

Outre les motifs généraux qui ont poussé le monde entier à s'orienter vers les énergies renouvelables, il existe plusieurs raisons spécifiques qui attirent l'attention sur l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie malgré la présence d'un stock important d'énergies traditionnelles, ce qui rend cette exploitation des ressources nationales richesse avec de nombreux retours dans divers domaines économiques, y compris commerciaux, environnementaux, sociaux et autres.

I.5.1 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau local

Parmi les domaines et secteurs qui seront touchés par l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau local, nous mentionnons les suivants :

Premièrement : répondre aux besoins de la demande nationale d'électricité et de gaz

- L'Algérie travaille à augmenter progressivement la production d'électricité à partir des énergies renouvelables d'ici 2030 à 40% de la production totale d'électricité, dans le but de répondre aux besoins en énergie électrique du marché local, en tenant compte notamment de l'augmentation de la population, qui se traduit par une demande accrue pour l'énergie, ce qui aura également un effet positif sur les différents secteurs. [26]
- Le secteur domestique bénéficie de l'électricité nécessaire à la vie quotidienne, en utilisant des équipements et appareils électroménagers énergivores. Le besoin en électricité des ménages augmentera également avec l'augmentation de la population et l'augmentation des taux d'urbanisation, en raison de l'augmentation des taux de migration de la campagne vers la ville.
- Le développement technologique adopté dans le domaine des énergies renouvelables permet de transporter de l'électricité dans toutes les zones qui ne pouvaient pas être alimentées en électricité par des moyens traditionnels auparavant, car fournir de l'électricité par ces moyens traditionnels aux habitants des zones isolées aurait entraîné de réels problèmes tels que comme des coûts d'ingénierie et de transport de carburant excessifs, il serait donc nécessaire d'équiper les zones isolées éloignées des réseaux de communication du sud algérien de centrales solaires pour couvrir le déficit en électricité, afin de couvrir les besoins énergétiques pour améliorer les conditions de vie et utiliser les énergies renouvelables pour pomper l'eau vers les zones reculées et les bidonvilles pour l'irrigation ainsi que l'éclairage.

Deuxièmement : économiser de l'énergie

- Ce programme fait partie de l'assurance fourniture d'énergie depuis vingt ans ou plus. En termes d'économie d'énergie, par exemple, des ampoules blanches à incandescence répondant aux normes internationales de respect de l'environnement seront également commercialisées.[27]

Troisièmement : préserver les réserves d'énergie conventionnelles et diversifier les sources d'énergie

- L'utilisation d'énergies renouvelables pour produire de l'électricité, selon le programme national, une grande partie du gaz économisé sera stockée, tandis que le reste sera être exportés, ce qui rapportera au pays des revenus financiers supplémentaires au cours de la même période. En se tournant vers les énergies renouvelables, l'Algérie évitera une exploitation excessive du pétrole et le préservera pour les générations futures.
- De plus, l'Algérie pourra réduire sa dépendance économique aux hydrocarbures et soutiendra son économie avec une ressource énergétique permanente pour la continuité, en plus d'éviter les fluctuations de prix et de retomber dans les crises.

Quatrièmement : la protection de l'environnement et la réduction de la pollution

- L'Algérie croit à l'importance de l'environnement et à son attachement aux accords internationaux pour préserver le climat et faire face aux changements néfastes pour l'environnement. Le fait que les énergies renouvelables contribuent à réduire les gaz à effet de serre et à faire face au changement climatique, et aident à résoudre d'autres problèmes environnementaux tels que la pollution et la détérioration de la qualité de vie.

Cinquièmement : le secteur agricole

- Le secteur agricole est considéré comme l'un des piliers de l'économie nationale, en raison de sa contribution effective à la sécurité alimentaire. Par conséquent, depuis l'indépendance, l'Algérie a accordé une grande attention à ce secteur, et avec la présence des énergies renouvelables, il a été utilisé dans de nombreuses activités, notamment les pompes solaires pour l'irrigation dans les zones isolées du raccordement au réseau électrique, le chauffage et les serres. Fournir des récoltes en quantités abondantes et de bonne qualité à des prix compétitifs par rapport à celles produites par les méthodes traditionnelles pour atteindre l'autosuffisance et la sécurité alimentaire, ainsi que pour l'exportation.

I.5.2 La faisabilité de l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau international

Parmi les domaines et secteurs qui seront touchés par l'exploitation des énergies renouvelables par l'Algérie au niveau international figurent :

Premièrement : exporter de l'électricité

- L'Algérie peut exporter de l'électricité à partir de l'énergie solaire depuis le désert algérien, compte tenu de la position qu'elle occupe au niveau méditerranéen en termes de sites de production de ce type d'énergie, et l'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité fait l'objet d'une grande attention de la part des pays.

Deuxièmement : la conclusion de contrats de partenariat

- L'Algérie a signé des accords de coopération dans le domaine des énergies alternatives avec un certain nombre de pays, dont la France, les États-Unis, la Russie, la Chine, l'Allemagne et le Japon. Cela soutiendra l'avancement des énergies renouvelables en Algérie, où le partenariat est l'un des meilleurs moyens d'acquérir des connaissances techniques et de transférer des technologies. Par contact direct et indirect, en plus de l'apprentissage, la technologie est un facteur essentiel pour le développement de l'institution économique, étant donné les développements rapides qui se produisent dans le domaine de la technologie jour après jour, il est difficile pour l'Algérie d'obtenir ces développements en raison de leur coût élevé. Cela signifie que la stratégie de partenariat vise à réduire ces coûts de recherche dans ce domaine et à être une alternative potentielle au transfert de technologie de manière accessible. [27]

Troisièmement : le secteur de l'industrie et du commerce

- L'un des objectifs du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique 2011-2030 est d'augmenter la contribution du secteur industriel, à travers le développement et la localisation de l'industrie des équipements d'énergie renouvelable à plus de 80% d'ici début 2030. Avec des compétences, et l'introduction de technologies d'énergies renouvelables dans les zones rurales et urbaines, ainsi que des projets industriels complexes qui dépendent principalement de l'énergie traditionnelle, et changent le chemin de leur exploitation énergétique vers des énergies vertes à devises fortes et diversifient ainsi l'économie.[20]

I.6 Programme de développement des énergies renouvelables

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eaux solaires, les carburants propres (GPLc et GNC), et les équipements industriels performants.

Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes.[26]

I.6.1 Obstacles à l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables en Algérie.

Alors que certaines sources ont indiqué, comme mentionné ci-dessus, qu'il existe toutes les possibilités d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables en Algérie, d'autres estimations ont indiqué qu'il existe certains obstacles qui entravent l'utilisation optimale des ressources naturelles spécialisées dans les énergies renouvelables, qui sont déterminées par les succursales suivantes :

- **Coûts élevés**

Il est vrai que les possibilités et les ressources pour l'exploitation des énergies renouvelables sont disponibles en Algérie, notamment l'énergie solaire et éolienne, mais le problème réside dans les coûts élevés qui limitent l'expansion de cette industrie à bien des égards, et l'aspect des coûts dans le domaine des industries d'investissement est lié à l'étendue de la technologie disponible pour faire tourner et utiliser de manière optimale les ressources inhérentes aux énergies renouvelables, où les prix d'investissement sont un facteur décisif dans l'évaluation de la faisabilité économique des projets énergétiques selon certaines hypothèses. Ainsi, le facteur coût est l'un des facteurs les plus importants affectant le niveau de faisabilité économique des projets d'énergie renouvelable en Algérie, car il est lié aux effets du progrès technologique, qui varie d'une source à l'autre.

- **Prix du carburant**

Les prix des carburants sont un facteur majeur affectant la faisabilité économique des projets d'énergie renouvelable en Algérie et déterminant leur avenir proche. Cela est dû au fait que les produits des projets d'énergies renouvelables en Algérie peuvent parfois être complémentaires aux produits énergétiques traditionnels, et donc leur demande est affectée par les prix de ces produits. Sans aucun doute, l'escalade des prix du carburant au cours des dernières années a grandement contribué à améliorer la viabilité économique des projets d'énergie renouvelable à l'échelle mondiale, ainsi que les investissements dans cette industrie.

I.6.2 Les énergies renouvelables dans les exploitations agricoles

Les besoins énergétiques du secteur agricole ne cessent d'augmenter en lien avec l'augmentation de la population et de la superficie des terres arables. L'approvisionnement énergétique du secteur agricole continue d'être un problème en raison de son éloignement des zones résidentielles, de ses coûts élevés, des produits énergétiques et de la connectivité du réseau électrique. Les énergies renouvelables peuvent contribuer à résoudre ce problème grâce aux nombreuses solutions et possibilités qu'elles offrent.

D'autre part, le secteur agricole en vertu de son fonctionnement est un secteur très adapté à l'utilisation des énergies renouvelables en raison de sa disponibilité dans les espaces ouverts du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, des chutes d'eau et des marées ou la croissance des plantes.

Les énergies renouvelables pouvant être développées à la campagne sont nombreuses et diversifiées. Nous pouvons citer [28] :

- les cultures énergétiques (Miscanthus, La culture du saule en Taillis Très Courte Rotation (TTCR), colza en tant que Combustible ou en tant qu'huile végétale pour la production d'agro-carburant).
- les énergies éoliennes (les espaces ruraux sont susceptibles d'accueillir des parcs éoliens importants, mais les exploitations agricoles proprement dites peuvent aussi utiliser de petites éoliennes pour produire une partie de l'électricité dont elles ont besoin).
- les centrales photovoltaïques (permettant de produire de l'électricité à l'aide de la technologie des cellules PV qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Nous pouvons citer certaines applications : éclairage au niveau des bâtiments d'élevage, alimentations des pivots d'irrigation des terres agricoles).
- les centrales thermiques (le besoin en eau chaude sur une exploitation d'élevage).
- les déchets agricoles nombreux (effluents, pailles, céréales qui peuvent être utilisés comme combustibles ou dans un processus de digestion).

I Conclusion

Malgré la domination totale des énergies traditionnelles sur le marché des échanges énergétiques externes, ces énergies connaissent des développements rapides, en termes de quantité et de qualité des énergies échangées. Cela est dû à plusieurs facteurs tels que les réserves disponibles, les prix de l'énergie, les politiques suivies par les gouvernements et les organisations internationales de l'énergie, et d'autres, tous ces facteurs provoquent une instabilité des marchés de l'énergie, ce qui a conduit à une tendance mondiale claire vers les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire.

En revanche, si les énergies traditionnelles représentent la base des échanges énergétiques mondiaux, elles sont pour l'Algérie la sève de toute son économie, et il suffit d'en conclure que 92% des revenus du pays proviennent de ses exportations, et parce que l'Algérie n'est pas à l'abri de aux problématiques des énergies traditionnelles, elle s'est également appuyée sur des stratégies de valorisation de son potentiel énergétique solaire et de développement de son utilisation à travers des objectifs actuels et des projets futurs, afin d'améliorer son exploitation et son exportation.

De ce point de vue, en abordant les différents concepts d'énergies traditionnelles et renouvelables, nous avons conclu que l'Algérie n'est pas loin de l'utilisation des énergies renouvelables, mais cela ne se fera que s'il existe une volonté forte et réelle de promouvoir l'exploitation de cette source d'énergie.

En guise de conclusion, l'énergie solaire photovoltaïque a un énorme potentiel pour le pompage de l'eau pour l'irrigation et pour le bétail. Par ailleurs, l'énergie solaire thermique peut intervenir sous différents usages y compris le chauffage des maisons et les étangs d'élevage.

Chapitre II

*État de l'art technologique
dans le secteur agricole*

II Introduction

La forte croissance démographique est accompagnée d'une augmentation des besoins en alimentation agricole. Le secteur agricole fait partie des secteurs les plus énergivores qui confrontent plusieurs défis énergétiques à savoir l'augmentation du coût des énergies fossiles d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part. De ce fait, l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. [29]

Les innovations technologiques notamment dans les systèmes photovoltaïques ont permis d'améliorer le rendement des fermes agricoles, et de sophistiquer également plusieurs de leurs tâches et applications telles que l'élevage des bovins et l'irrigation.

II.1 Système solaire photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble d'éléments de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement : le champ PV, le régulateur de charge, le système de stockage (dans certains cas), l'inverseur de courant (DC /DC ou/et DC/ AC), et la charge. [30]

Les systèmes solaires photovoltaïques fonctionnent comme suit :

La lumière solaire entre par la surface des modules photovoltaïques, où elle est convertie en énergie électrique de courant continu (générateur photovoltaïque). Plus tard, cette énergie est collectée et conduite au système de régulation de charge (régulateur) dont la fonction est d'envoyer cette énergie de manière totale ou partielle au système de stockage (batterie), où elle est stockée avec la précaution de ne pas excéder les limites de surcharge et de décharge profondes. Cette énergie stockée est utilisée pour le ravitaillement des charges pendant la nuit, en jours de faible ensoleillement ou lorsque le système photovoltaïque est incapable de satisfaire la demande lui-même.[31]

Quand les charges à alimenter sont de courant continu, elles s'alimentent de manière directe. Quand les charges sont de courant alternatif, l'énergie s'envoie à un inverseur de courant où elle est convertie en courant alternatif (onduleur). [31]

On distingue 3 types du système photovoltaïque : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées. [29]

II.1.1 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est un système dont le générateur PV injecte sa puissance partiellement ou totalement dans le réseau électrique à travers un onduleur. [30]

Les installations raccordées en permanence au réseau utilisent l'énergie du réseau lorsque le générateur PV n'est pas en mesure de produire l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du consommateur. [32]

II.1.1.1 Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est le suivant, un générateur photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité. Le courant continu produit par les modules photovoltaïques est transformé, via un onduleur PV, en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public, ensuite la production de l'installation photovoltaïque est injectée totalement dans le réseau. [33]

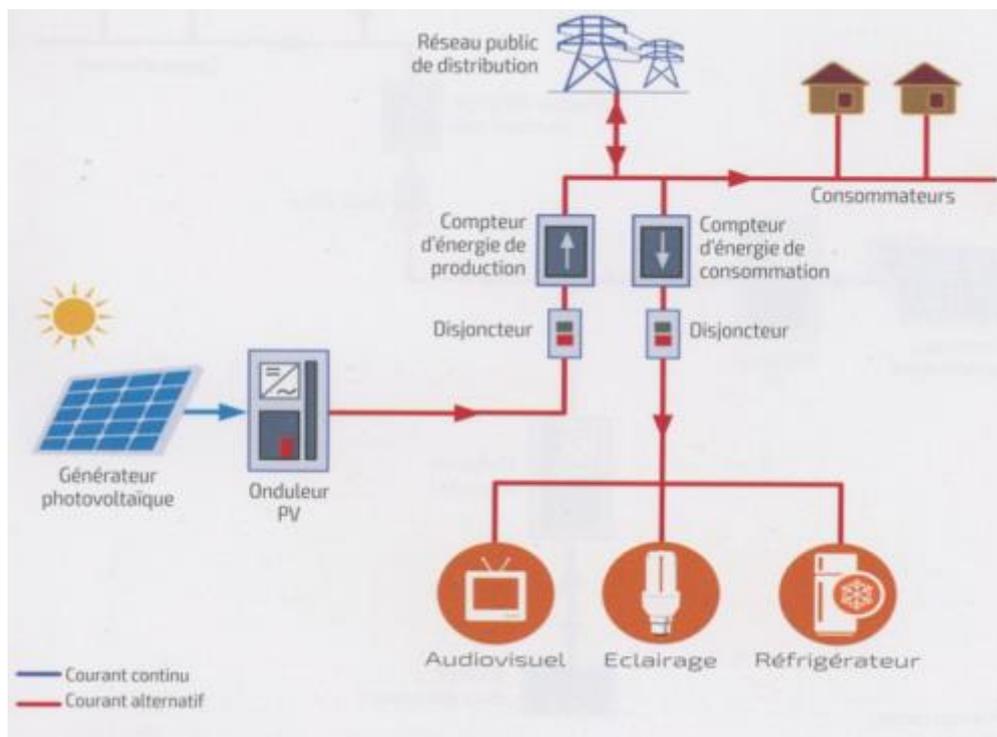


Fig.II.1 : Exemple d'un système photovoltaïque à injection totale. [33]

II.1.1.2 Systèmes à injection du surplus

Le système photovoltaïque fonctionne comme précédemment mais il est connecté directement sur l'installation électrique intérieure du site. L'électricité solaire est autoconsommée par les récepteurs en service. L'excédent éventuel d'électricité solaire produit est injecté dans le réseau public. [33]

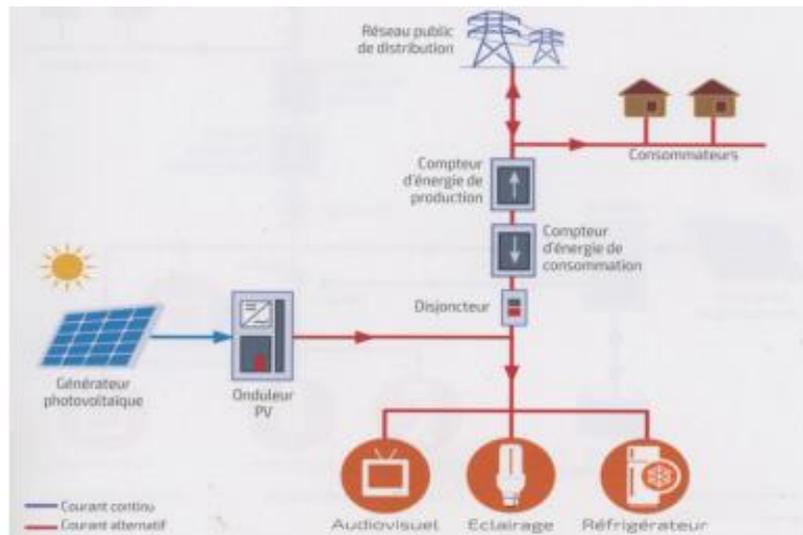


Fig.II.2 : Exemple d'un système photovoltaïque à injection du surplus. [33]

On retrouve les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau aussi bien au sol que sur des bâtiments d'habitation, tertiaires, agricoles et industriels. Les centrales de production électrique à base de générateurs photovoltaïques de grande puissance sont destinées à être raccordées directement sur le réseau public de distribution d'électricité, ou sur le réseau du transport d'électricité. [33]

Ils ont l'avantage de renforcer la puissance électrique nationale installée, et de produire d'électricité renouvelable à un coût compétitif par rapport aux solutions à base d'énergies fossiles et sans dégagement de gaz à effet de serre. En plus, ils sont des systèmes de production simples et rapides à mettre en œuvre avec une durée de vie supérieure à 25 ans. En revanche, ils ont aussi quelques points faibles tels que la nécessité d'un réseau fiable et stable pouvant supporter le raccordement de la centrale, et la nécessité d'un réseau sous tension en permanence alimenté par d'autres sources en raison de l'intermittence de l'énergie solaire. [33]

II.1.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

Le système photovoltaïque autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). [30]

Les applications les plus communes sont utilisées pour alimenter ce qui suit :

- Maisons en site isolé ;
- Équipement du pompage de l'eau ;
- Équipement de surveillance à distance ;
- Stations de transmission de données et d'observation météorologique ou sismique ;
- Systèmes de protection contre la foudre ;

- Systèmes de signalisation routière, portuaire ou aéroportuaire ;
- Services de caravanes et camping-cars ;
- Installations publicitaires. [32]

Il existe 2 types du système photovoltaïque autonome : Les systèmes au fil du soleil et les systèmes avec stockage.

II.1.2.1 Systèmes photovoltaïques autonomes au fil du soleil

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes qui exploitent directement l'énergie solaire sans stockage (batteries) et sans aucune source d'appoint. [30]

En journée, le générateur photovoltaïque alimente la charge directement ou via un convertisseur Courant Continu/Courant Continu (CC/CC) ou Courant Continu/Courant Alternatif (CC/AC). La puissance délivrée à la charge est en fonction de l'ensoleillement. Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil. [33]

Les principales applications photovoltaïques fonctionnant au fil du soleil sont les suivantes : le pompage, la ventilation, la production de froid, le dessalement d'eau de mer...[33]

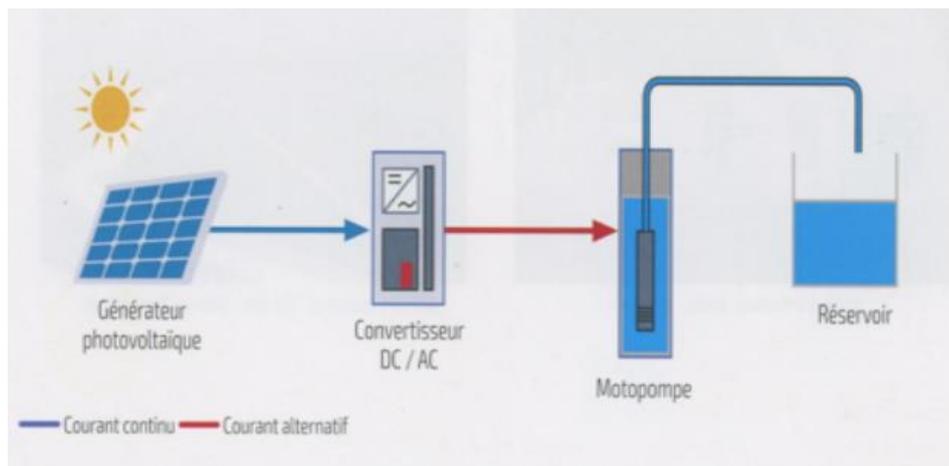


Fig.II.3 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil). [33]

II.1.2.2 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage, afin d'emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie (ensoleillement faible ou absence totale de l'ensoleillement). [30]

II.1.3 Systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. [29]

On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides selon la présence ou non de stockage :

- Des systèmes photovoltaïques avec accumulateurs couplés avec une source d'énergie renouvelable et/ou un groupe électrogène ;
- Des systèmes photovoltaïques sans accumulateurs couplés avec une source d'énergie renouvelable et/ou un groupe électrogène ; [33]

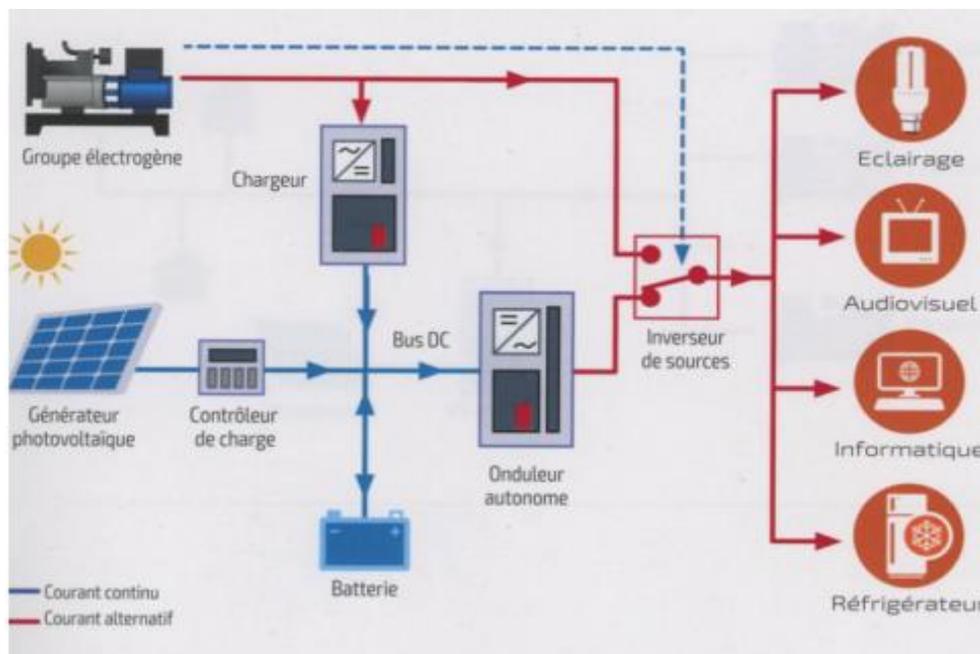


Fig.II.4 : Installation d'un système hybride (couplage PV /générateurs diesel) avec stockage. [33]

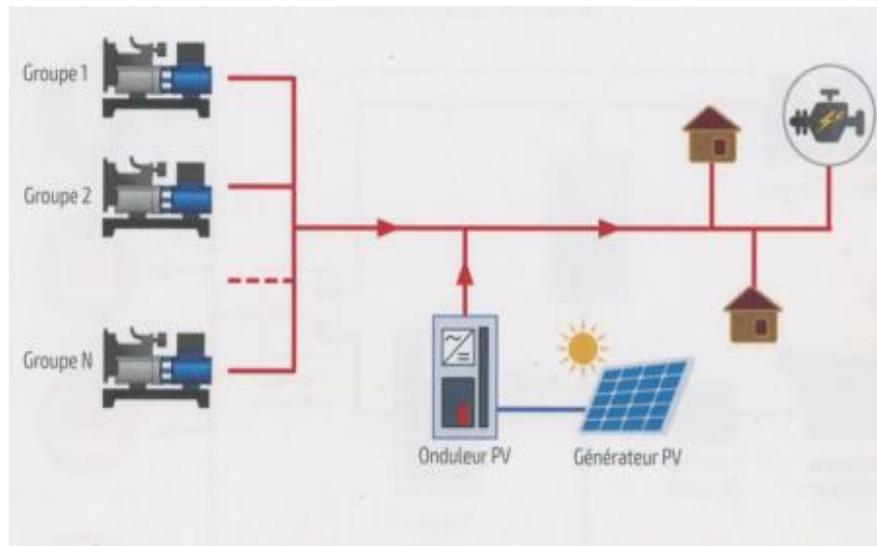


Fig.II.5 : Installation d'un système hybride (couplage PV /générateurs diesel) sans stockage. [33]

II.2 Composants des systèmes solaires photovoltaïques

II.2.1 Panneaux photovoltaïques

Le module photovoltaïque convertit directement la lumière du soleil en courant électrique continu par le biais des cellules solaire. [31]

II.2.1.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction « P-N » a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. [29]

Quand l'ensemble photovoltaïque s'expose au rayonnement solaire, les photons contenus dans la lumière transmettent leur énergie aux électrons des matériaux semi-conducteurs. Ces électrons peuvent alors franchir la barrière de potentiel de la jonction P-N et sortir du matériau semiconducteur à travers un circuit extérieur, donnant lieu à un courant électrique. [31]

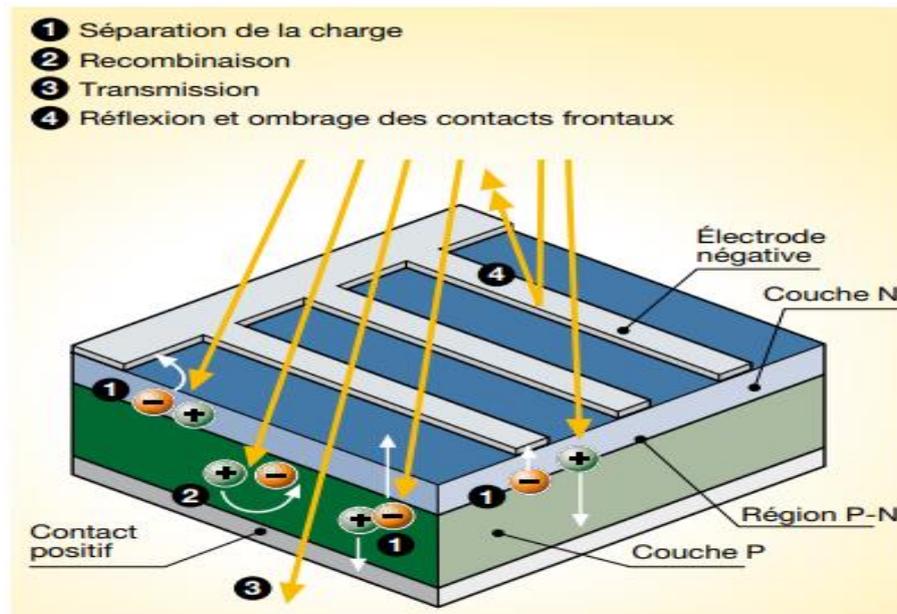


Fig.II.6 : Principe de l'effet photovoltaïque. [32]

II.2.1.2 Types de panneau photovoltaïque

II.2.1.2.1 Panneaux photovoltaïques classiques

- **Panneau photovoltaïque monocristallin** : Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie. Elles ont un rendement de 12 à 18%, avec une durée de vie de 30 ans. [34]
- **Panneau photovoltaïque polycristallin** : Les panneaux PV avec des cellules polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Elles ont un rendement de 11 à 15% avec une durée de vie de 30 ans. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, et donc un coût de production moins élevé. [34]
- **Panneau photovoltaïque amorphe** : La technologie de ce type de panneau permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines, qui est estimé de 6 à 8 %. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première. [34]

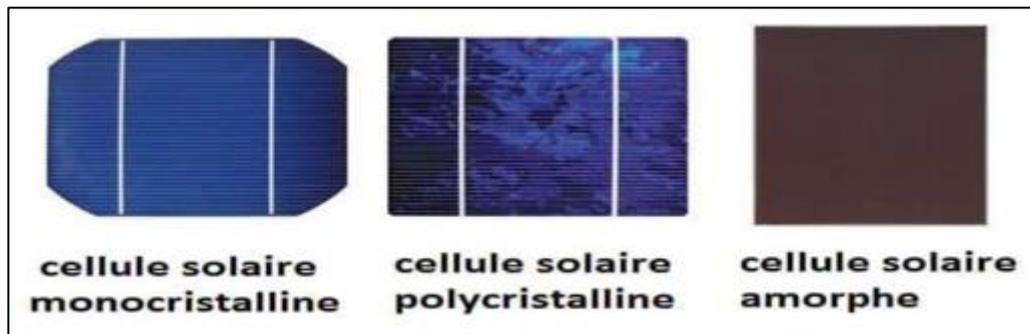


Fig.II.7 : Cellules photovoltaïques classiques. [35]

II.2.1.2.2 Panneaux photovoltaïques nouvelle génération

- **Panneaux photovoltaïques Bi-verre :** Les panneaux photovoltaïques bi-verre ont un processus de fabrication légèrement différent des panneaux photovoltaïques traditionnels. Au cours de la conception, les cellules photovoltaïques monocristallines ou polycristallines se retrouvent encapsulées entre deux plaques de verre de 2mm d'épaisseur [36], or, dans un panneau classique, seule la face orientée vers le ciel est faite de verre trempé. [37]

Tab.II.1 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques Bi-verre. [38]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Plus résistants aux intempéries, aux phénomènes de pressions-dépressions et aux agressions chimiques ; - Plus stables dans le temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas plus performants que les panneaux classiques dans des conditions climatiques normales (les performances sont optimisées uniquement dans certaines conditions extrêmes) ; - Un prix plus élevé que pour des panneaux solaires classiques ; - Plus lourds que les panneaux classiques.

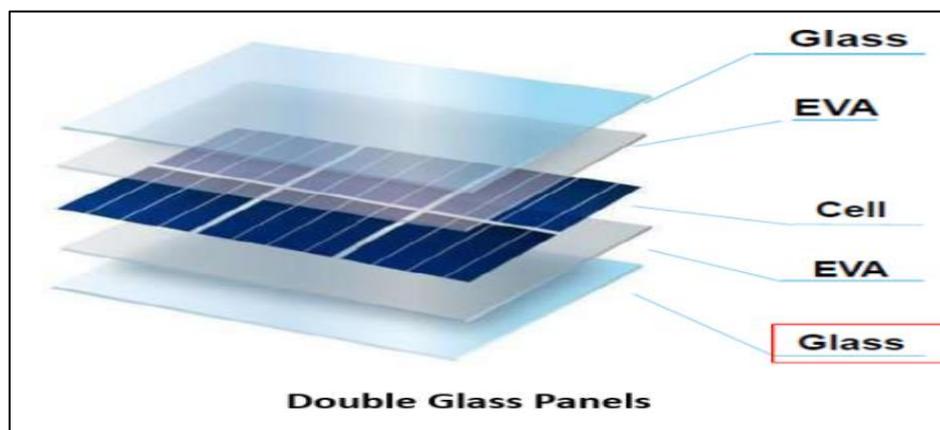


Fig.II.8 : Panneau photovoltaïque Bi-verre. [39]

- **Panneaux photovoltaïques Bi-faciaux (à double face) :** les panneaux solaires bifaciaux sont équipés de cellules solaires sur les faces externe et interne, ce qui permet de capter à la fois le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire réfléchi [38]. Cette solution ingénieuse repose sur des modules semi-transparents et des panneaux fixés à une faible distance du support, permettant à la lumière de se refléter. [36]

Cette technologie solaire photovoltaïque se base sur le principe de l'albédo (la quantité du rayonnement solaire réfléchi par une surface) ; les rayons solaires réfléchis par un sol neigeux, sableux ou de couleur claire peuvent être captés par le dos du panneau solaire bifacial. [38]

Tab.II.2 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques Bi-faciaux. [38]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Un rendement plus important qu'avec un panneau monoface sur les surfaces de couleur claire ; – Une solution performante sur les sols clairs (zones désertiques, neigeuses ou champs de culture) 	<ul style="list-style-type: none"> – Ils ne sont pas adaptés à une installation photovoltaïque classique sur toiture ; – Des prix plus élevés que ceux des panneaux monofaces.

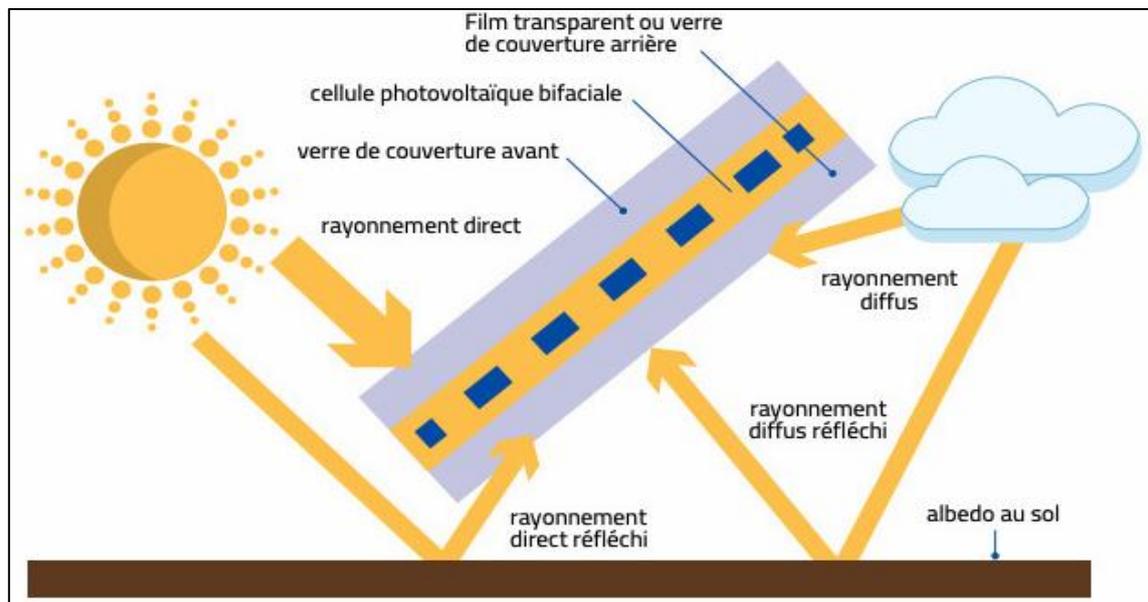


Fig.II.9 : Principe de fonctionnement du panneau photovoltaïque Bi-facial. [40]

- **Panneau photovoltaïque en Pérovskite :** Les pérovskites sont une famille de matériaux présentant une structure cristalline spécifique, nommée d'après le minéral qui constitue leur structure. Il se trouve dans la nature en faible quantité. Cependant, sa structure peut aisément être reproduite par l'humain. [38], [41]

Les panneaux en pérovskite peuvent produire plus d'énergie à partir du soleil que n'importe quel autre matériau, Son efficacité a augmenté rapidement en laboratoire, passant de 3 % en 2009 à plus de 25 % en 2020. [41]

Tab.II.3 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques en Pérovskite. [38], [41]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Rendement supérieur à 22 % ; – Très peu coûteux ; – Utilise moins de matériaux pour absorber la même quantité de lumière que le silicium ; – Des cellules plus rapides à produire que celles en silicium. En effet, le silicium doit être pur et dépourvu de défauts pour être exploité. La pérovskite, en revanche, tolère les défauts et peut être exploitée plus facilement ; – Un matériau transparent, souple et léger. 	<ul style="list-style-type: none"> – Les cellules en pérovskite sont constituées d'une petite quantité de plomb, nocif pour l'environnement et la santé ; – Se décomposent rapidement en raison de l'exposition à la chaleur, à l'humidité, à la neige, etc. – Une plus grande fragilité que les cellules en silicium ; – Encore très peu commercialisés.

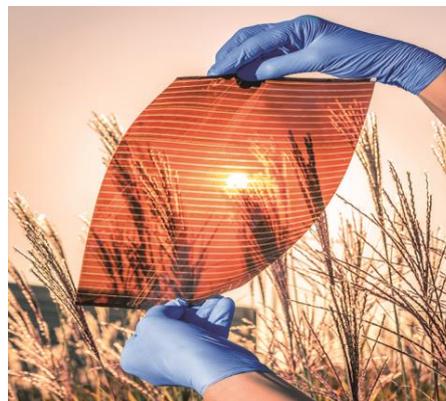


Fig.II.10 : Cellule solaire en Pérovskite. [42]

- **Panneaux photovoltaïques organiques** : Les panneaux photovoltaïques organiques sont composés de cellules organiques, qui disposent d'une couche active faite de molécule organique (carbone, azote...) [36]. Cette molécule organique remplace le silicium comme semi-conducteur pour produire de l'électricité à partir d'énergie solaire. [41]
 Contrairement aux cellules photovoltaïques en silicium, les cellules organiques sont fabriquées à partir de composés généralement dissous dans de l'encre et imprimés sur des plastiques fins. Cela leur confère une flexibilité qui permet de les incorporer dans davantage d'endroits ou structures que les cellules photovoltaïques au silicium classique. [41]

Tab.II.4 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques organiques. [38], [41]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Économies de matériaux car les cellules organiques sont 1 000 fois plus fines que les cellules en silicium ; - Un rendement plus intéressant que les panneaux solaires classiques - Plus légers ; - Une meilleure stabilité de rendement car ils sont insensibles à la chaleur ; - Respectueux de l'environnement ; - Faciles à installer. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une durée de vie inférieure à celle des panneaux solaires classiques.

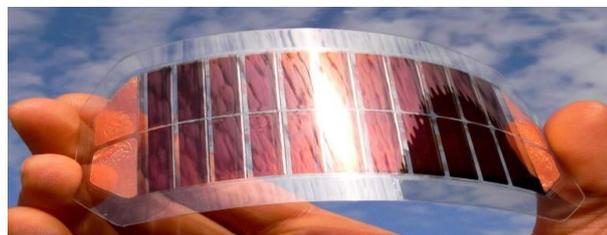


Fig.II.11 : Cellule solaire organique. [43]

➤ **Panneaux solaires aérovoltaiques** : Les panneaux solaires aérovoltaiques sont constitués de cellules photovoltaïques auxquelles a été ajouté un système de ventilation placé sous les panneaux, permettant l'exploitation de l'air chaud qui est dégagé par les cellules [44] ;

Les capteurs photovoltaïques reçoivent les rayons solaires et les transforment en électricité, cela produit de la chaleur au dos du panneau et cet air chaud est ensuite transmis dans l'habitation pour la chauffer. De plus, l'air qui passe sous le module pour être chauffé permet de refroidir les cellules photovoltaïques, et donc d'améliorer leurs rendements. [45]

Tab.II.5 : Avantages et inconvénients des panneaux solaires aérovoltaiques. [44]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ils offrent une double fonction ; production de l'électricité et de la chaleur ; - Ils permettent de limiter la perte de production du photovoltaïque quand les températures montent grâce à l'exploitation de la chaleur dégagée ; - Ils offrent un bon système de ventilation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ils sont plus chers que du photovoltaïque classique ; - La ventilation ne peut pas remplacer une ventilation mécanique contrôlée (VMC) ; - Ils nécessitent une modification de la toiture ; - L'habitation doit être parfaitement isolée ; - La longévité est difficile à estimer.

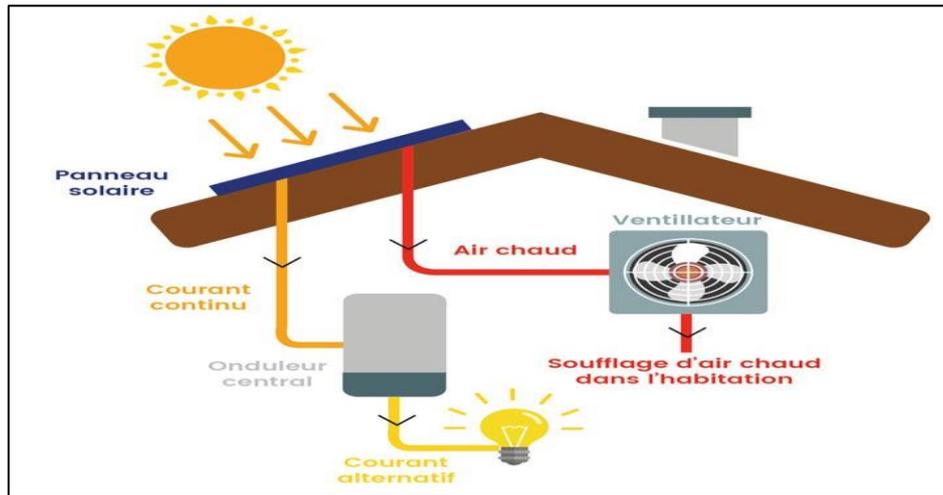


Fig.II.12 : Fonctionnement du panneau solaire aérovoltaique. [46]

- **Panneaux solaires hybrides** : Les panneaux solaires hybrides permettent la production d'électricité et de la chaleur en simultané. La face avant du panneau solaire est constituée de cellules photovoltaïques. À l'arrière, un échangeur de chaleur transfère la chaleur des panneaux photovoltaïques ou du soleil à un liquide qui non seulement chauffe l'eau du ballon mais refroidit également le panneau solaire pour maximiser la production d'électricité. [41]

Tab.II.6 : Avantages et inconvénients des panneaux solaires hybrides. [41],[44]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Double production : électricité et eau chaude ; - Le rendement énergétique est de 70 à 90 % ; - Optimisation de la surface utilisée ; - Durée de vie de 20 ans en moyenne. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix d'installation élevé ; - Nécessitent de la maintenance ; - Ne couvrent pas entièrement les besoins en chauffage en hiver.

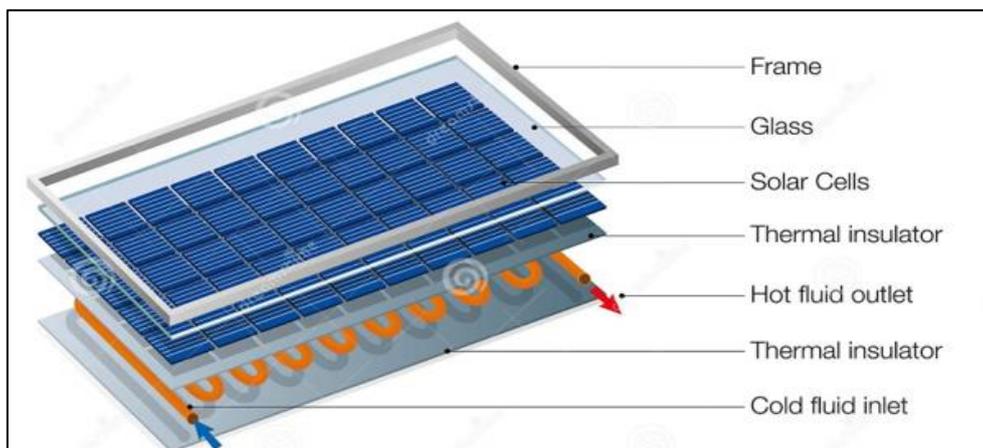


Fig.II.13 : Panneau solaire hybride. [47]

- **Panneaux photovoltaïques en couches minces** : Ils sont produits à partir de silicium mais en couches extrêmement fines. Le photovoltaïque en couche mince se divise en deux grandes familles : le Tellure de Cadmium (CdTe) et un alliage de cuivre, d'indium et de sélénium (CIS). Dans le cas du photovoltaïque en couche mince, le semi-conducteur est vaporisé directement sur un matériau support, comme le verre par exemple. [36]

Tab.II.7 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques en couches minces. [38]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Une technologie moins onéreuse ; – Une fabrication moins polluante que pour les panneaux classiques ; – Plus légers et plus souples que des panneaux classiques. 	<ul style="list-style-type: none"> – Un rendement plus faible qu'avec un système photovoltaïque classique.



Fig.II.14 : Panneau photovoltaïque en couches minces. [48]

- **Panneaux photovoltaïques avec Micro-onduleur intégré** : Dans ce dispositif le panneau solaire est pré-équipé avec des micro-onduleurs ; le micro-onduleur est intégré sur la face arrière de chaque module dès sa fabrication en usine. [37]

Tab.II.8 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques avec Micro-onduleur intégré. [38]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Une pose plus simple et plus rapide qu'avec un panneau photovoltaïque classique ; – Une maintenance facilitée : possibilité de changer uniquement le micro-onduleur ou le module en cas de problème, puisqu'ils ne sont pas soudés l'un à l'autre ; – Pas de risque de surchauffe. 	<ul style="list-style-type: none"> – Prix encore plus élevé.

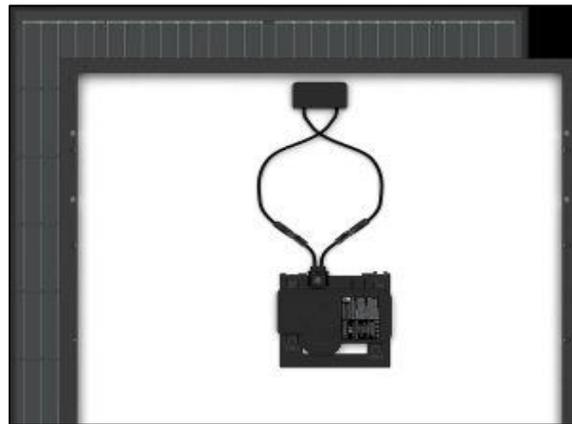


Fig.II.15 : Panneau photovoltaïque avec Micro-onduleur intégré. [49]

- **Panneaux photovoltaïques « Back Contact »** : La technologie « Back Contact » permet d'étendre la surface de production d'électricité en reliant les cellules photovoltaïques les unes aux autres à l'arrière des panneaux. [38]

Tab.II.9 : Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques « Back Contact ». [38]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Un rendement optimisé grâce à une surface de production plus large ; – De meilleures performances ; – Des panneaux solaires plus discrets. 	<ul style="list-style-type: none"> – Un dispositif plus onéreux dû au coût de fabrication plus élevé.



Fig.II.16 : Comparaison entre cellules classiques et cellules « Back contact ». [50]

- **Panneaux photovoltaïques avec technologie MBB (« multi-bus bar »)** : Un « bus bar » est un dispositif conducteur électrique constitué de métal qui permet de faire circuler du courant de la cellule photovoltaïque au panneau. Les cellules classiques sont composées de 3 à 4 bus bars, alors que les cellules MBB sont équipées de plus de 5 bus bars. L'avantage de cette technologie est d'optimiser la production d'électricité des panneaux solaires. [38]

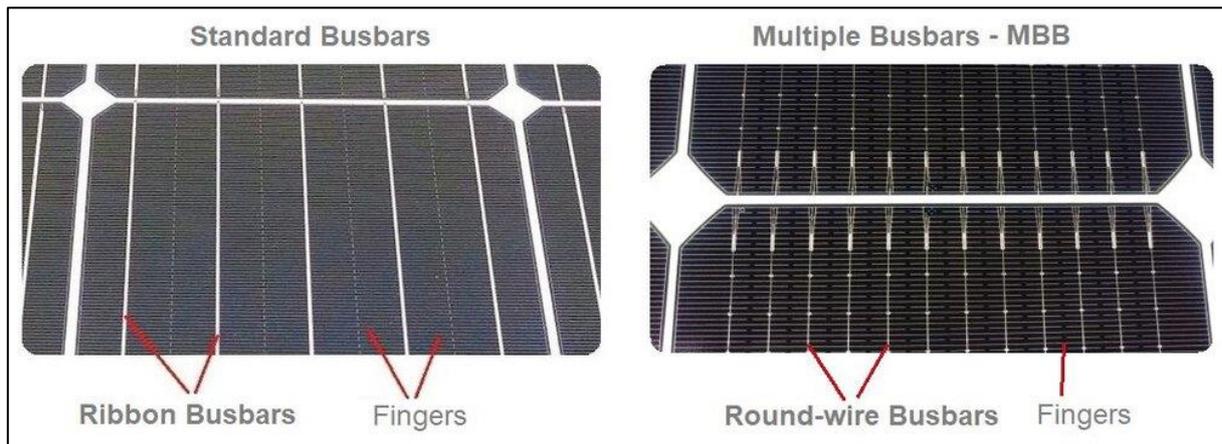


Fig.II.17 : Comparaison entre cellules classiques et cellules MBB. [51]

- **Panneaux photovoltaïques optique-solaires** : Le système optique-solaire contient des ampoules qui permettent de concentrer les rayons solaires vers les cellules photovoltaïques, aussi, une plaque en cuivre a été positionnée sous les cellules chauffant l'eau qui passe dans un échangeur juste en dessous. Ce dispositif dispose en plus d'un système de repérage permet au panneau de suivre le parcours du soleil dans le ciel et de maintenir ainsi la captation maximale tout au long de la journée. Ce panneau a l'avantage d'avoir un rendement de près de 40%, mais un coût d'achat très excessif. [45],[52]



Fig.II.18 : Panneaux photovoltaïques optique-solaires. [52]

- **Panneaux photovoltaïques nocturnes** : Il s'agit de cellules photovoltaïques « anti-solaires » aptes à produire de l'énergie durant la nuit, dont le but est d'utiliser la terre comme source de chaleur, et le ciel nocturne comme dissipateur de chaleur [53]. Le panneau nocturne utilise les flux de chaleur pour produire de l'électricité ; La nuit, les panneaux dégagent la chaleur emmagasinée au cours de la journée pour refroidir. Ce changement de température permet aux cellules thermoradiatives de produire de l'énergie électrique. [45]

La production d'énergie est largement inférieure à celle du jour mais il permet de produire environ 25% de ce qu'il produit en journée. Cela permettrait d'avoir un système complètement autonome du réseau public. Mais le panneau nocturne n'est qu'un prototype à l'heure actuelle, et tous ses avantages sont très théoriques. [45]

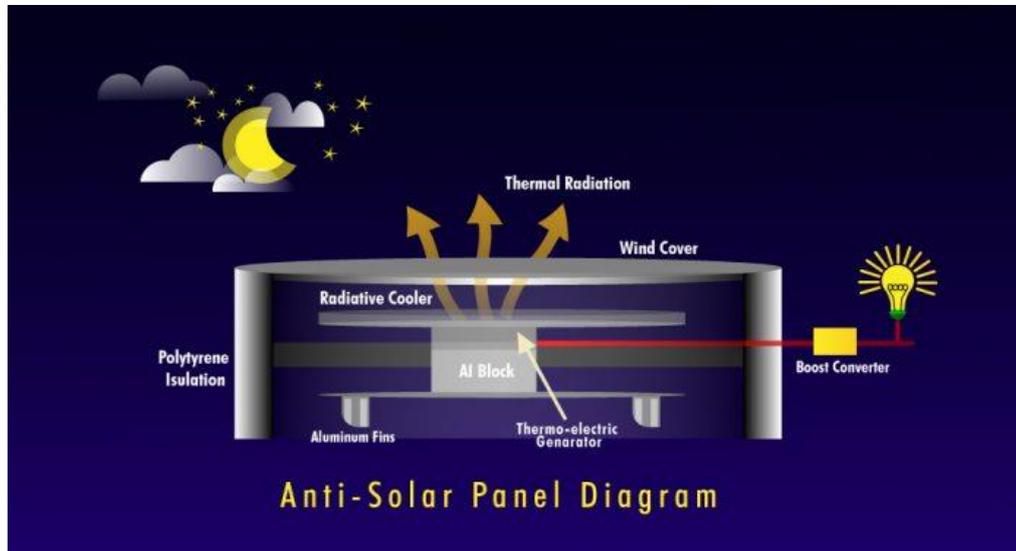


Fig.II.19 : Cellule anti-solaire. [54]

- **Panneaux photovoltaïques Insolight** : Le panneau Insolight est composé de plusieurs cellules photovoltaïques à haut rendement. Elles sont positionnées sous des lentilles en nid d'abeille qui permettent d'envoyer les rayons solaires directement sur les cellules. Cette technologie permet d'avoir un rendement de 37% contre 18% pour une installation standard. Leur efficacité est supérieure même par temps nuageux car ce système permet de concentrer le rayonnement solaire sur les cellules. [45]



Fig.II.20 : Panneaux photovoltaïques Insolight. [55]

- **Tuiles solaires** : Les tuiles solaires sont de petits modules qui peuvent être fixés sur la toiture existante ou même la remplacer. Elles peuvent être constituées de cellules photovoltaïques à couche mince ou de cellules solaires monocristallines traditionnelles. Le courant produit par les cellules photovoltaïques est transformé grâce à l'onduleur central et l'énergie est conservée dans une batterie. [38],[41]

Tab.II.10 : Avantages et inconvénients des tuiles solaires. [38],[41]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Plus esthétiques et discrets ; – Disponibles en plusieurs tailles et styles. 	<ul style="list-style-type: none"> – Installation parfois complexe ; – Prix d'installation élevé ; – Rendement faible ; – Difficulté de la maintenance : difficile de déterminer et réparer la tuile défailante.



Fig.II.21 : Tuiles solaires. [56]

- **Panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments « BIPV »** : Les BIPV sont des modules solaires utilisés à la place de matériaux de construction traditionnels. Ils se fondent dans l'architecture du bâtiment ce qui les rend plus esthétiques. Ils peuvent être utilisés pour former un toit, un auvent ou une façade. Les BIPV permettent d'économiser de l'argent sur le matériel de construction et sur les futures factures d'électricité. Ils améliorent aussi l'isolation du bâtiment et son efficacité énergétique. [45]



Fig.II.22 : Panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments. [57]

- **Panneaux photovoltaïques flottants** : Les panneaux flottants sont installés en mer dans des zones non navigables, permettent de produire de l'énergie sans utiliser des terres viables pour l'agriculture ou la construction immobilière. [45]

L'eau permet de refroidir les modules et d'améliorer leur rendement. En parallèle, les panneaux font écran entre le soleil et l'eau ce qui permet de réduire le réchauffement des lacs et réservoirs. Cela permet de réduire l'apparition d'algues et l'évaporation naturelle de l'eau. [45]



Fig.II.23 : Panneaux photovoltaïques flottants. [58]

II.2.2 Batteries

La batterie a pour fonction le stockage d'une partie de l'énergie produite par les panneaux, afin qu'elle soit disponible dans des périodes où le rayonnement solaire est faible ou inexistant. [31]. Elle remplit trois fonctions importantes :

- Autonomie : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans être rechargée.
- Courant de surcharge : une batterie permet de fournir un courant de surcharge supérieur à celui fourni par les panneaux.
- Stabilisation de la tension : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. [29]

Une batterie est composée par l'association en série de plusieurs « éléments » ou « cellules », chacun d'eux comprenant deux électrodes dans une dissolution électrolytique. Entre les deux électrodes, une différence de potentiel de près de deux volts est établie, et la valeur instantanée dépend de l'état de charge de la batterie [31]. Elle est caractérisée par sa capacité, sa tension, la charge et le courant maximum qu'elle peut supporter, la conservation de la charge, sa durée de vie en nombre de cycles ou en années. [29]

Les batteries transforment l'énergie électrique qu'elles reçoivent des modules photovoltaïques en énergie chimique. Cette conversion est réalisée à partir de la réaction qui se produit lorsque deux matériaux différents (tels que des plaques positives et négatives) sont immergés dans l'électrolyte. L'électricité s'écoule de la batterie dès qu'un circuit électrique est connecté entre les pôles positif et négatif. [59]

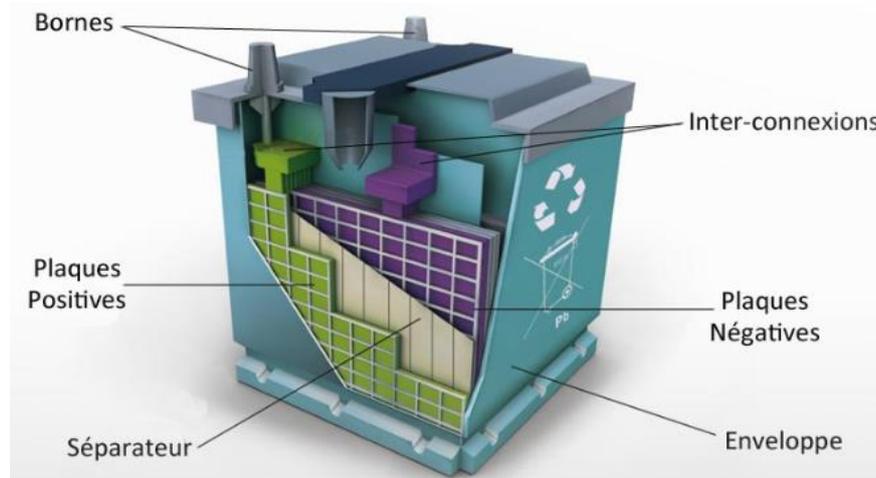


Fig.II.24 : Structure de la batterie. [60]

II.2.2.1 Types de batteries

- **Batteries à plomb ouvert** : La batterie à plomb ouvert est la plus ancienne batterie rechargeable, elle produit de l'oxygène et de l'hydrogène lorsqu'elle est en fonctionnement. Il est donc important de pouvoir la placer dans un endroit bien aéré. Cependant, il faut veiller à ce que la température ambiante ne descende pas trop en hiver, car cette batterie solaire est sensible au froid et au gel. [61]

Tab.II.11 : Avantages et inconvénients de la batterie à plomb ouvert. [62]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Prix réduit ; – Technologie fiable, robuste et éprouvée. 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite un entretien régulier ; – Faible durée de vie (400-500 cycles) ; – Profondeur de décharge entre 60 et 80% ; – Volumineuse, ; – Nécessite d'être placé dans un endroit aéré ; – Sensible au froid et au gel ; – Adaptée pour une utilisation intermittente ; – Toxique pour l'environnement.

- **Batteries AGM (Absorbed Glass Mat)** : La batterie AGM est une sorte de batterie au plomb. L'acide est fixé dans de la fibre de verre (situé entre les électrodes), donc il est mieux et plus rapidement absorbé par les plaques de plomb de la batterie. [59]
Sur ce type de batterie, il est souvent écrit « VRLA » (Valve Regulated Lead Acid), Cela signifie qu'elle est équipée d'une valve qui renouvelle automatiquement la production d'énergie sans avoir à remplir la batterie d'acide. [63]

Son principal avantage est le fait qu'elle ne nécessite pas d'entretien. Elle présente en plus l'intérêt d'être étanche et de ne pas dégager d'hydrogène ni de chaleur durant les cycles de charge ou de décharge. Plus adaptée aux utilisations quotidiennes, elle peut faire l'objet d'une utilisation régulière, sans que ses performances en soient affectées. [62]

Tab.II.12 : Avantages et inconvénients de la batterie AGM. [59], [62]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite pas d'entretien ; - Peu polluante ; - Faible taux d'autodécharge ; les pertes d'énergie sont minimales, lorsqu'elle n'est pas utilisée ; - Plus de résistance aux climats froids. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix plus élevé ; - Son cycle de vie est relativement faible (600-700 cycles) ; - Profondeur de décharge d'environ 80% dans la plupart des cas ; - Sensible à l'élévation de la température ; - Toxique pour l'environnement.

- **Batteries en gel** : Les batteries en gel pour panneau solaire représentent la technologie plomb poussée à son maximum. Du gel de silice est ajouté afin de figer l'électrolyte. Leur nombre de charges et de décharges élevé les rend particulièrement appropriées à une utilisation quotidienne. À l'instar des batteries AGM, les batteries en gel sont étanches et ne nécessitent pas d'entretien. [61]

Tab.II.13 : Avantages et inconvénients de la batterie en gel. [62], [63]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Cycle de vie élevé (900 cycles) ; - Supporte les décharges profondes ; - Ne nécessite pas d'entretien ; - Peu polluante ; - Adaptée à tout type de saisons. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix très élevé ; - Sensible au rythme élevé et successif de charge et de décharge ; - Toxique pour l'environnement.

- **Batteries au lithium-ion**: Il s'agit du type de batterie le plus récent, qu'on retrouve dans de nombreux objets quotidiens tels que les téléphones portables, les voitures électriques, etc. Sans entretien, légères, stocke plus d'énergie dans un petit espace et résistantes face aux décharges profondes, elles peuvent être utilisées pendant une vingtaine d'années. [61]

Tab.II.14 : Avantages et inconvénients de la batterie au lithium-ion. [62]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Meilleure durée de vie : jusqu'à 6000 cycles – Elle peut être déchargée plus profondément que les batteries au plomb – Ne nécessite pas d'entretien – Recyclable à 70 % – Compacte, elle prend moins de place 	<ul style="list-style-type: none"> – Coût beaucoup plus élevé par rapport aux autres batteries.

➤ **Batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd) :** Les batteries au nickel-cadmium ne sont pas aussi largement utilisées que les batteries au plomb ou au lithium-ion. Leur principal avantage est qu'elles sont durables et ne nécessitent ni d'entretien ni de systèmes complexes de gestion de la batterie. Elles ont également la capacité de fonctionner à des températures extrêmes. Cependant l'utilisation de ce type de batterie est interdite dans certains pays en raison que le Cadmium est extrêmement toxique. [64]

➤ **Batteries à flux :** Elles contiennent un électrolyte liquide à base d'eau qui circule entre deux réservoirs séparés à l'intérieur de la batterie. Parmi les meilleures caractéristiques de ces batteries est qu'elles ont une longue durée de vie estimée à 30 ans et une profondeur de décharge de 100 %. [64]

Les batteries à flux sont malheureusement beaucoup plus chères que les autres types de batteries solaires. Elles ont également une capacité de stockage relativement faible par rapport à d'autres systèmes de batteries, et un taux de charge et de décharge médiocre. [64]

II.2.2.2 Batteries du futur

Les batteries du futur sont réalisées avec l'objectif de faire des économies, d'utiliser des systèmes électrochimiques plus denses, plus légers et plus puissants. Également de réduire leur empreinte sur l'environnement. [61],[65]

Parmi les batteries du futur performantes et recyclables on recense :

- Le Power-to-Gas : le surplus d'électricité est stocké sous forme de gaz (hydrogène ou méthane) par électrolyse de l'eau ; [61]
- Batterie au sel ou batterie sodium-ion : le sodium a l'avantage d'être naturellement très présent sur Terre. Ce type de batterie offrirait un cyclage très élevé, et pourrait être produit à faible coût ; [61]
- Batterie à flux organique : son fonctionnement repose sur des sels minéraux piochés dans les résidus de fruits. [61]
- Batteries tout-solide : l'électrolyte liquide est remplacé par un composé inorganique solide qui permet la diffusion des ions lithium. Leur premier grand avantage est qu'elles sont ininflammables lorsqu'ils sont chauffés. Deuxièmement, elles permettent l'utilisation de

matériaux innovants haute tension et haute capacité, pour des batteries plus denses et plus légères avec une meilleure durée de vie en raison d'une autodécharge réduite ; [65]

- Batteries lithium-soufre : cette batterie a l'avantage de contenir des matières actives très légères et d'avoir une longue durée de vie. [65]

La majorité de ces batteries ne sont que des prototypes. Les autres qui ont déjà fait l'objet d'un prototype, ne seront pas commercialisées avant quelques dizaines d'années. [61], [65]

II.2.2.3 Batterie virtuelle

Le stockage virtuel permet de mettre de côté l'électricité produite, mais pas consommée, afin de l'utiliser plus tard. L'énergie en surplus n'est pas stockée dans une solution physique, mais directement réinjectée pour en faire bénéficier les autres via le réseau électrique. Dans le cas du besoin d'énergie, il est possible d'utiliser à un coût avantageux l'équivalent de l'énergie produite plus tôt. [61],[62]

L'un des principaux avantages du stockage virtuel est qu'il n'est pas limité à la capacité de stockage d'un appareil, il est également très simple à mettre en place, puisqu'il ne nécessite pas de travaux ni d'installation particulière. Le plus gros désavantage de la batterie virtuelle est l'inéligibilité à la prime à l'autoconsommation et le paiement des taxes et des frais d'acheminement. [61],[62]

II.2.3 Régulateur de charge

Le régulateur de charge solaire est un composant indispensable d'un système solaire photovoltaïque autonome. Il est mis en place dans le système solaire entre les panneaux solaires et le parc à batterie. [66]

Un régulateur de charge solaire remplit 2 fonctions [66] :

- Sa fonction principale est qu'il protège la batterie contre la surcharge ; il coupe le courant allant du panneau solaire vers la batterie quand la batterie est pleinement chargée ; Il est donc limiteur de charge ;
- Sa deuxième fonction est qu'il protège la batterie contre la décharge profonde ; quand les utilisations sont branchées sur la sortie du régulateur de charge, il déconnecte les utilisations quand la batterie descend en dessous d'un seuil critique d'état de charge de la batterie ; Il est donc limiteur de décharge.

Les régulateurs de charge pour installations photovoltaïques autonomes peuvent se caractériser en trois principaux groupes :

- Les régulateurs de charge shunt qui court-circuite le panneau solaire en fin de charge de la batterie, ils régularisent la surcharge ; [66]
- Les régulateurs de charge série qui intègrent un interrupteur entre le panneau solaire et la batterie pour l'arrêt de la charge, ils régularisent la surcharge et la décharge. La majorité des

régulateurs de charge à impulsions de largeurs variables PWM (Pulse With Modulation) utilise cette technique ; [66]

- Les régulateurs à Maximum Power Point Tracker (MPPT) : dans ces régulateurs, un circuit électronique mesure en permanence la tension et le courant des panneaux solaires pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale MPPT. Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. L'avantage de ce genre de régulateur, est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température. Cette technologie est réservée aux systèmes de plusieurs centaines de Watts pour que le gain d'énergie compense le prix plus élevé de ce type de régulateur. [67]

II.2.4 Onduleur

Les onduleurs sont des équipes qui transforment la tension continue fournie par les modules en une tension différente, soit alternative (onduleurs DC/AC) ou soit continue (onduleurs DC/DC) afin de diminuer ou d'augmenter la tension en CC des récepteurs qui fonctionnent en CC. [31]

Il existe plusieurs types d'onduleur solaire DC/AC, notamment [68] :

- **Le micro-onduleur** : Aussi appelé onduleur module, il s'agit de l'onduleur solaire qui est le plus souvent mis en place et utilisé pour les logements particuliers. De petite taille, il s'installe directement derrière chaque panneau solaire pour transformer l'électricité continue en courant alternatif. Chaque panneau a donc son propre onduleur et est indépendant, ce qui permet une production optimale même en cas de panne, et par conséquent une plus grande évolutivité du parc solaire ;
- **L'onduleur de chaîne (ou onduleur string)** : Ce type d'onduleur solaire recueille et transforme l'électricité fournie par plusieurs panneaux solaires en même temps. Plus puissant, il permet de n'avoir qu'un seul onduleur qui gère plusieurs panneaux photovoltaïques, ce qui simplifie l'installation et l'entretien.
- **L'onduleur central** : Comme l'onduleur de chaîne, il se branche au bout d'une série de panneaux photovoltaïques. Il est cependant plus imposant et peut gérer plusieurs chaînes de panneaux. On privilégie son installation lorsque le parc de panneaux solaires commence à être important. Il prend la forme d'une armoire installée au sol. Il est particulièrement adapté pour les locaux professionnels et industriels.
- **L'onduleur à batterie** : Il intègre une batterie de stockage qui permet de garder l'excédent d'électricité pour l'utiliser lorsque ce sera nécessaire.
- **L'onduleur Bi tracker** : Ce type d'onduleur est très adapté aux installations qui présentent différentes inclinaisons et/ou différentes orientations. Il peut également remplacer un appareil en cas de panne. Ainsi, il prend le relais le temps de corriger le problème, ce qui peut être très pratique.
- **L'onduleur hybride** : La dernière génération d'onduleur, appelée « hybride », est intelligente. Selon le paramétrage, il est capable de déterminer lui-même si l'électricité produite doit être utilisée immédiatement, stockée dans une batterie, ou injectée dans le réseau. De la même façon, l'onduleur hybride est capable de gérer les différentes sources d'énergie afin de déterminer quel type d'électricité utiliser à quel moment.

II.3 Applications de l'énergie solaire dans le secteur agricole

Divers dispositifs et systèmes d'absorption de l'énergie solaire ont été développés et sont en cours de réalisation pour des applications agricoles. Il s'agit notamment de dispositifs solaires thermiques et électriques tels que les pulvérisateurs solaires, le chauffage solaire des serres, les séchoirs solaires, les pompes à eau solaires, la ventilation pour le bétail, les pompes d'aération solaires, l'électricité solaire, etc. [69]

II.3.1 Machines solaires de pulvérisation et de semis

La machine solaire de pulvérisation de pesticides est conçue pour les petits agriculteurs afin d'améliorer leur productivité. Ils peuvent facilement transporter et manipuler ces machines avec des batteries rechargeables et des options d'éclairage solaire direct. La plupart du temps, la pulvérisation des pesticides se fait pendant la journée. Ces pulvérisateurs peuvent donc être utilisés en captant directement l'énergie solaire, ce qui évite l'installation de batteries dans ces machines. De même, les semoirs alimentés par l'énergie solaire constituent un moyen simple et pratique de répandre et de semer les graines dans les petits champs, ainsi que dans les zones où les machines traditionnelles ne sont pas disponibles. [69]



Fig.II.25 : Pulvérisateur agricole à énergie solaire. [70]

II.3.2 Tracteurs à énergie solaire

Les tracteurs utilisent généralement du diesel comme source d'énergie, ce qui augmente le budget de l'agriculture et pollue l'atmosphère en produisant du dioxyde de carbone pendant la combustion. Les tracteurs à énergie solaire sont devenus une bonne option qui peut travailler directement sous le soleil en consommant de l'énergie solaire par le biais d'un système PV dans la journée et qui peut aussi continuer à travailler dans la nuit en utilisant l'énergie stockée dans des batteries. [69]

Une autre façon d'utiliser l'énergie solaire est de la convertir en électricité dans une centrale solaire et de charger les batteries des tracteurs. Mais l'énergie stockée dans les batteries d'un tracteur électrique solaire est très faible qui ne permet de fonctionner que pendant une courte période. [69]



Fig.II.26 : Tracteur à énergie solaire. [71]

II.3.3 Séchoir solaire

Le séchoir solaire est un dispositif utilisé pour le séchage des cultures et des aliments afin d'éliminer l'humidité des cultures et des produits alimentaires pour les conserver avec le taux d'humidité souhaité, ce qui permet de prolonger la durée de conservation et d'améliorer la qualité des produits pendant une longue période. Les deux principaux types de séchoirs sont les séchoirs actifs et les séchoirs passifs, qui dépendent du système de chauffage. Dans les séchoirs solaires actifs, des dispositifs mécaniques sont utilisés pour le transfert de chaleur de l'énergie solaire, comme des pompes et des ventilateurs pour le flux d'énergie solaire du collecteur d'énergie solaire aux lits de séchage des cultures, tandis que la chaleur du séchoir passif circule d'une manière naturelle. [69]

Différents types de séchoirs solaires sont utilisés pour diverses applications en fonction de la méthode de transfert de chaleur, de leur géométrie et de leur structure. [69]

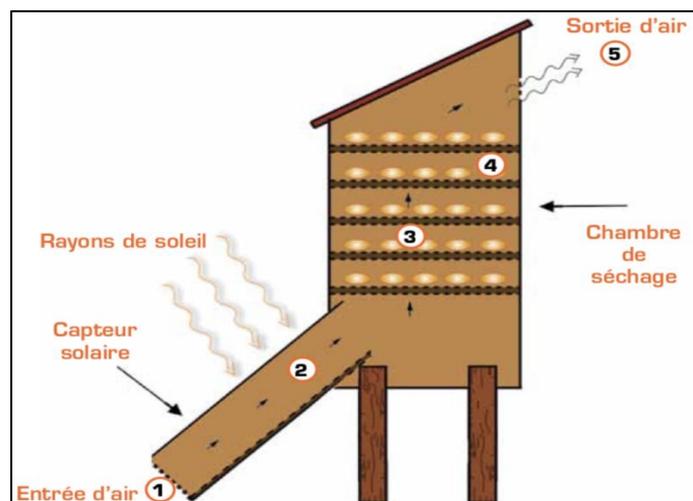


Fig.II.27 : Séchoir solaire. [72]

II.3.4 Alimentation en électricité par énergie photovoltaïque

Certaines exploitations agricoles sont situées dans des zones isolées, ce qui fait des panneaux photovoltaïques une solution idéale. Ils sont utiles pour satisfaire les besoins en électricité de la ferme tels que l'éclairage, les appareils ménagers, les équipements de exploitations d'élevage des bovins, etc.

II.3.5 Chauffage de l'eau et des locaux

Les exploitations d'élevage et de production laitière ont des besoins variables en matière de chauffage de l'eau et des locaux. Les agriculteurs modernes élèvent des animaux tels que le bétail et la volaille dans des structures fermées. De ce fait, les capteurs solaires sont utilisés pour contrôler de la température et la qualité de l'air, ainsi que pour chauffer de l'eau. [73]

II.3.6 Serres solaires

Les installations de serres photovoltaïques consistent à intégrer sur la structure d'une serre, des modules photovoltaïques pour produire de l'électricité. Afin de laisser passer la lumière, les modules PV peuvent être « semi-transparentes » : avec des cellules cristallines en laissant passer une partie de la lumière entre les cellules, ou avec des couches minces en partie transparentes. [74]



Fig.II.28 : Serre agricole avec panneaux solaires semi-transparentes. [75]

L'application de l'énergie photovoltaïque dans une serre agricole permet de répondre à ses besoins en électricité et en chauffage en créant un climat favorable pour la croissance des plantes sans compromettre l'environnement. Cependant, une installation d'un système photovoltaïque n'est pas toujours adéquate pour une structure d'une serre déjà existante.

II.3.7 Pompage solaire

Le pompage solaire est une technique qui permet de puiser l'eau d'une source hydraulique (bassin, puit, forage, un cours d'eau, etc.) grâce à l'énergie solaire photovoltaïque. Le système capte l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 350 mètres vers un réservoir de stockage ou un système d'irrigation. [76]

Dans une ferme agricole le pompage solaire est généralement utilisé pour l'irrigation des cultures, l'abreuvement du bétail, le remplissage des bassins ou des réservoirs, l'approvisionnement en eau potable et la gestion des réserves d'eau.

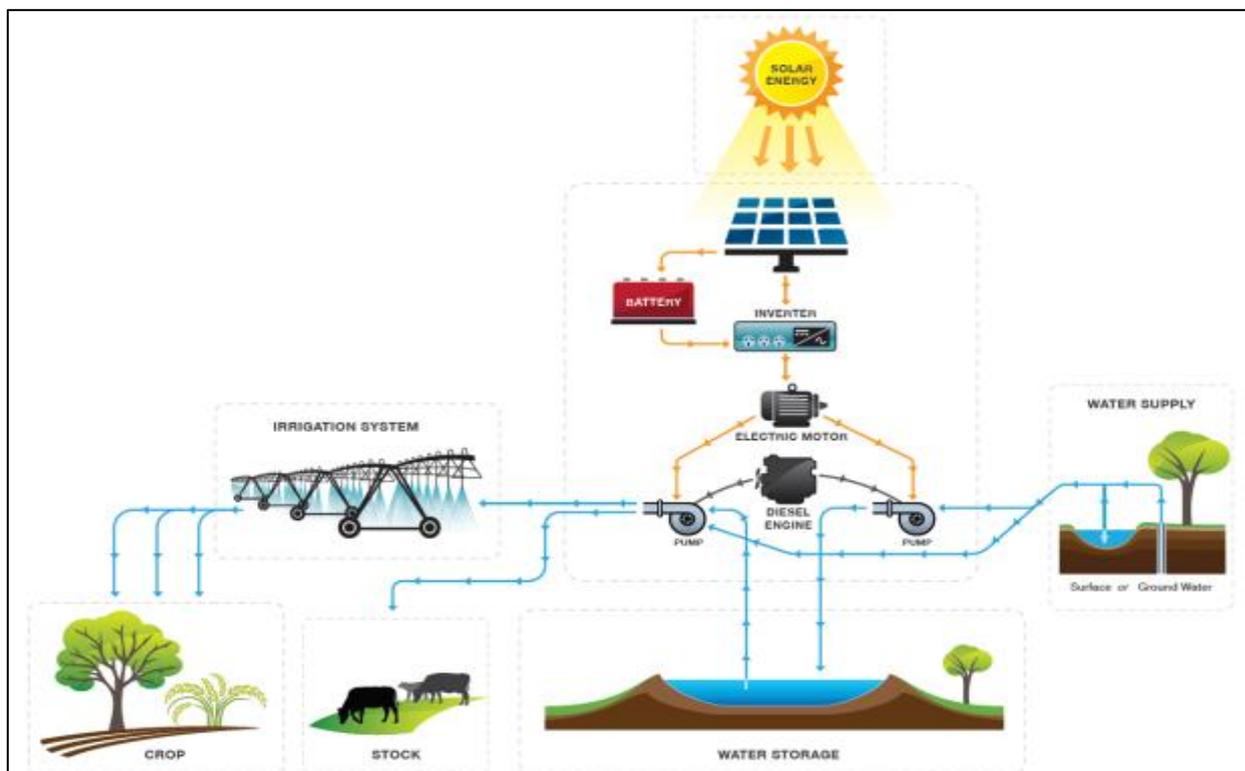


Fig.II.29 : Pompage solaire dans une ferme agricole. [77]

II.3.7.1 Types du système de pompage solaire

II.3.7.1.1 Pompage au fil du soleil

Ce système ne nécessite pas de batteries. Le stockage se fait d'une manière hydraulique, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, l'eau est pompée vers un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Ce type de pompage solaire permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. [29]

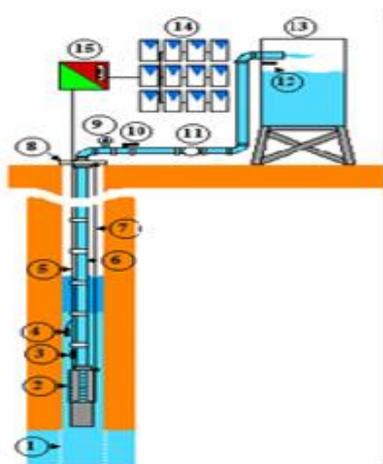
II.3.7.1.2 Pompage solaire avec batterie

Ce type de pompage utilise des batteries pour stocker l'énergie électrique produite, ce qui permet d'avoir une disponibilité de l'eau en dehors des heures d'ensoleillement. Mais ce système est coûteux, peu durable, nécessite plus d'entretien et peut engendrer des baisses du rendement. [76]

II.3.7.2 Composants d'un système de pompage solaire

Un système de pompage solaire est composé essentiellement d'un ensemble d'éléments tels que [76] :

- Les panneaux photovoltaïques qui convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité sous forme de courant continu ;
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur électronique permettant de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance lumineuse captée par le générateur solaire. Le convertisseur électronique permet d'optimiser le rendement journalier de la pompe tout en assurant sa protection ;
- Une pompe immergée ou montée en surface constituée d'un moteur électrique à courant alternatif ou continu ;
- Un réseau hydraulique qui délivre l'eau de la source jusqu'au point de distribution.



1	crépine du forage
2	pompe
3	épissures
4	détecteur niveau bas
5	câblage électrique
6	canalisation
7	élingue de sécurité et de manutention
8	tête de puits
9	manomètre
10	vanne
11	compteur
12	détecteur réservoir plein
13	réservoir
14	panneaux photovoltaïques
15	convertisseur

Fig.II.30 : Composants d'un système de pompage solaire. [78]

II.3.7.3 Types de pompes solaires

Les pompes à eau sont classées selon :

- Leur principe de fonctionnement : soit de type centrifuge ou volumétrique ;
- Emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe de surface ou pompe immergée. [29]

II.3.7.3.1 Pompes volumétriques et pompes centrifuges

La différence entre une pompe volumétrique et une pompe centrifuge c'est l'énergie qui va être utilisée pour déplacer le fluide. La pompe centrifuge (pompe cinétique) va utiliser la force cinétique, tandis que la pompe volumétrique va utiliser l'énergie de la pression. [79]

Les pompes centrifuges vont aspirer un fluide au travers d'une roue, puis grâce à un mouvement de rotation, la roue tournant à plus ou moins grande vitesse, va refouler ce fluide. Les pompes centrifuges ont un rendement relativement élevé et sont capables de pomper un volume d'eau élevé. [79]

Les pompes volumétriques vont quant à elles fonctionner avec un piston plongeur (ou un piston avec membrane) qui va aspirer par dépression le fluide au travers d'un clapet. La pompe va ensuite refouler le fluide par une force de pression au travers d'un clapet opposé à celui par lequel il est rentré. [79]



Fig.II.31 : Pompe centrifuge et pompe volumétrique. [79]

II.3.7.3.2 Pompes de surface et pompes immergées

Les pompes de surface, destinées à faire remonter de l'eau pour des profondeurs et des pressions faibles ou moyennes. Elles sont donc recommandées pour puiser l'eau d'un récupérateur d'eau de pluie, de pomper l'eau d'une rivière, un bassin de jardin.

Les pompes immergées sont installées directement dans l'eau à puiser pour une hauteur d'aspiration peut dépasser les 100 m. Elles sont généralement utilisées pour une installation dans des puits, un forage, une citerne enterrée. [80]

II.3.7.4 Moteurs du système de pompage

Le moteur d'un groupe moto pompe est le dispositif qui assure la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans le cas d'un moteur à courant alternatif, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. [29]

II.3.7.5 Dimensionnement d'un système de pompage solaire d'irrigation

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors du dimensionnement d'un système de pompage solaire pour l'irrigation, tels que :

➤ **Le débit nécessaire :** Le débit nécessaire pour l'irrigation dépend des besoins en eau pour l'irrigation, type de culture, les facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la précipitation des pluies, l'évapotranspiration du sol), et la méthode d'irrigation.

Il existe différentes méthodes d'irrigation notamment [81] :

- Irrigation de surface : elle consiste à amener l'eau au point le plus haut du terrain et à la laisser s'écouler par gravité. L'eau est ensuite distribuée au champ, soit par submersion (irrigation par bassins), soit dans des sillons en terre (irrigation par sillons) ou bien par ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches) ;
- Irrigation par aspersion : elle consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle. La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'asperseurs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol ;
- Irrigation au goutte à goutte consiste à amener l'eau sous pression dans un système de canalisations munis d'orifices appelés goutteurs. Cette eau est distribuée en gouttes au champ par un grand nombre de goutteurs répartis tout le long des rangées des plantations. La zone humidifiée du sol est celle située au voisinage immédiat des racines des plantes. Par conséquent, cette méthode d'irrigation a un haut degré d'efficacité de distribution d'eau. [81]

- **La hauteur manométrique totale (HMT) :** Elle représente le total des contraintes hydrauliques liées à la hauteur ; hauteur d'aspiration (H_a), hauteur de refoulement (H_r), niveau dynamique (N_d), la longueur de tuyau (L), les pertes de charges (ΔP) et la pression utile à l'arrivée (P_u). Exprimé en mètres (m).
 - Niveau dynamique (N_d) : C'est la différence de dénivelé entre le niveau d'eau et le sol lorsque la pompe est en marche ;
 - Hauteur de refoulement (H_r) C'est la différence de dénivelé entre le sol et l'arrivée au point le plus haut de la cuve, du réservoir, du robinet, surpresseur, etc... ;
 - Hauteur d'aspiration (H_a) : Uniquement pour les pompes de surface, c'est la différence de dénivelé ou d'altitude en mètres (m) entre le niveau d'eau dynamique et la pompe ;
 - Perte de charge (ΔP) : C'est la perte de pression et de débit provoquée par les frottements de l'eau sur les parois des tuyaux. Plus le tuyau est long et le débit important, plus les pertes de charge augmentent ;
 - Pression utile (P_u) : C'est le besoin en pression à l'arrivée. [82]
- **L'énergie solaire disponible :** Elle dépend des valeurs moyennes journalières ou mensuelles de l'irradiation solaire du site de la ferme ;
- **Choix des composants :** Le choix des composants se fait selon leurs types, leurs caractéristiques énergétiques et leurs prix.

II.3.7.6 Avantages et inconvénients du pompage solaire

Un système de pompage solaire présente de nombreux avantages tels que [76] :

- Fonctionnement par source d'énergie renouvelable et gratuit,
- Pas d'achat de carburant, donc aucun frais ni de transport ni d'approvisionnement ;
- Faible cout de maintenance ;
- Un rapport qualité/prix idéal en comparaison aux systèmes de pompage classiques, plus particulièrement dans les zones isolées ;
- Préservation de l'environnement et aucune répercussion sur la santé des humains.

Il présente également quelques inconvénients [76] :

- Un coût d'investissement élevé par rapport aux autres systèmes de pompage classiques ;
- Un rendement variant en fonction du degré d'ensoleillement et de l'angle d'exposition des panneaux solaires.

II.4 Optimisation du système photovoltaïque dans une ferme agricole

II.4.1 Agrivoltaïsme

L'agrivoltaïsme ou agrophotovoltaïque consiste en l'installation de panneaux solaires sur des cultures agricoles. Cette pratique permet alors de protéger les cultures, tout en produisant de l'énergie renouvelable. En effet, les parcelles agricoles sont alors couvertes et protégées des intempéries grâce aux panneaux photovoltaïques. [83]

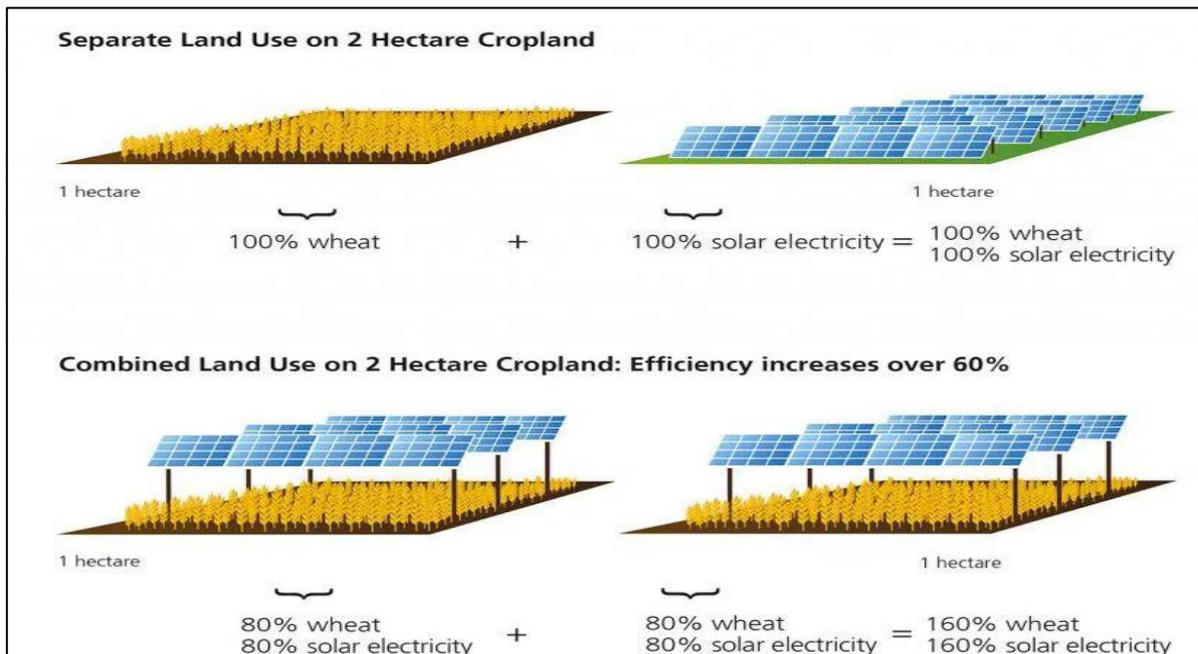


Fig.II.32 : Comparaison de l'efficacité de l'agriculture traditionnelle par rapport à l'agrivoltaïsme. [84]

II.4.1.1 Principe de fonctionnement de l'agrivoltaïsme

Les panneaux photovoltaïques sont installés sur des portiques solides. Ils sont ensuite amovibles, ce qui permet d'orienter les panneaux selon les cultures. En effet, les plantations peuvent alors être mises à l'ombre ou protégées de la pluie. [83]

Certaines installations agrivoltaïques sont équipées d'une multitude de capteurs disposés sur l'infrastructure afin de délivrer des informations sur la température, l'humidité, l'ensoleillement et la croissance du végétal. Les données sont ensuite envoyées dans un cloud. L'algorithme développé par le fournisseur prend en compte les données transmises automatiquement et des informations sur la croissance du végétal en question pour ordonner l'ouverture et la fermeture des panneaux. Le pilotage se fait à distance et de manière automatique. [85]

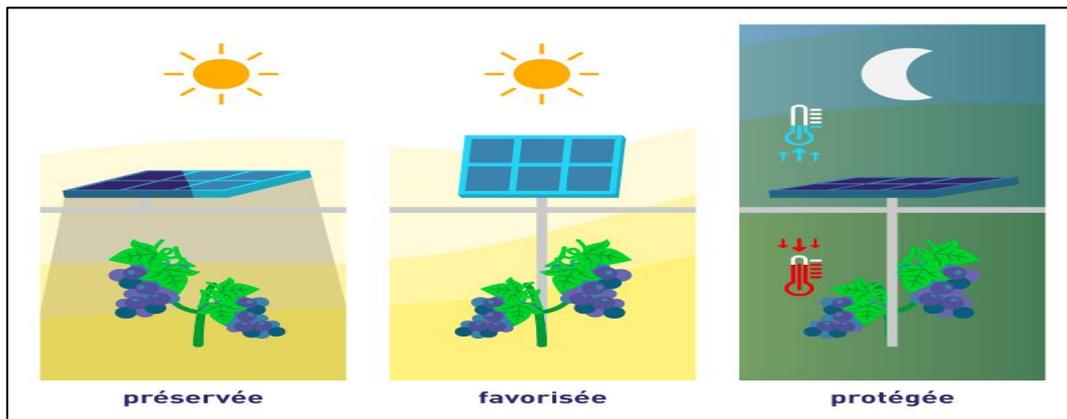


Fig.II.33 : Préservations des cultures avec une installation agrivoltaïque. [86]

II.4.1.2 Influence de l'agrivoltaïsme sur le nexus eau-énergie-alimentation

Les systèmes agrivoltaïques ont des implications prometteuses pour la production alimentaire, les économies d'eau et la production d'énergie renouvelable. La réduction de l'exposition directe au soleil sous les panneaux photovoltaïques a entraîné des températures de l'air plus fraîches pendant la journée et plus chaudes pendant la nuit, ce qui a permis aux plantes sous les panneaux solaires de retenir plus d'humidité que des cultures plantées à ciel ouvert. [87]

Une étude sur la comparaison des implications alimentaires, énergétiques et hydriques d'un système agrivoltaïque à un système d'agriculture traditionnelle a mené les résultats suivants :

- **Amélioration de la production alimentaire :** La production alimentaire a doublé dans le système agrivoltaïque par rapport à l'environnement traditionnel. En raison de l'effet de refroidissement de la transpiration des plantes sur les panneaux solaires. [88]
- **Économies d'eau :** Les plantes ont une limite à la quantité de soleil qu'elles peuvent utiliser. C'est ce qu'on appelle le point de saturation de la lumière. Une fois atteint, toute lumière au-delà de ce point n'augmente pas la photosynthèse et ne contribue pas à la croissance de la plante, elle augmente seulement la demande en eau de la plante. Elle fait simplement transpirer la plante, ce qui la rend plus assoiffée. [89]
- **Amélioration de la production d'énergie renouvelable :** Les panneaux photovoltaïques traditionnels montés au sol étaient nettement plus chauds pendant la journée que ceux avec le sous-étage végétal. En revanche, Les panneaux photovoltaïques agrivoltaïques étaient plus frais d'environ 9°C pendant la journée que les panneaux traditionnels, ce qui a permis d'obtenir un meilleur rendement. [87]

La colocalisation du PV et de l'agriculture pourrait offrir des résultats bénéfiques pour tous dans de nombreux secteurs, en augmentant la production agricole, en réduisant les pertes d'eau et en améliorant l'efficacité des panneaux PV. L'adoption de telles voies synergiques peut contribuer à la mise en place de systèmes de production alimentaire et énergétique résilients. [87]

II.4.1.3 Avantages et inconvénients de l'agrivoltaïsme

L'agrivoltaïsme présentent plusieurs avantages majeurs tels que :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole [90] ;
- Une double utilisation des terres, à la fois pour l'agriculture et pour l'énergie [90] ;
- Les cultures pratiquées sous la structure solaire aident à réduire la température de l'air ambiant en créant un climat plus frais, ce qui réduit indirectement la température des panneaux solaires jusqu'à 1 à 2 °C et augmente l'efficacité du système photovoltaïque [91] ;
- Les panneaux assurent une protection des cultures agricoles : besoin en ombre, ensoleillement, protection contre les nuisibles [92] ;
- Une production d'énergie durable ainsi qu'un revenu complémentaire [92] ;
- L'agrivoltaïsme permet de faire des économies d'eau via le principe de l'évapotranspiration (l'ombre des panneaux peut protéger les cultures en réduisant les températures et en empêchant une évaporation excessive). [93]

Cependant, l'agrivoltaïsme est encore au stade d'expérimentation. Les performances réelles, notamment sur le long terme, ne peuvent donc pas être complètement garanties même si les premiers résultats sont encourageants. [93]

Parmi les inconvénients d'une centrale agrivoltaïque est que son installation est assez complexe et doit prendre en compte de nombreux aspects pour être efficace dont notamment la disposition des panneaux solaires, le type du terrain ou encore la fiabilité des dispositifs de sécurité. Ainsi que son investissement initial qui reste toujours élevé. [93]

II.4.2 Tracker solaire

Le tracker solaire, également appelé suiveur solaire, est un bras motorisé qui permet à des panneaux photovoltaïques de suivre le soleil tout au long de la journée. Il permet d'améliorer le rendement d'une installation photovoltaïque suivant l'orientation et de l'inclinaison des panneaux. [94]

II.4.2.1 Fonctionnement des trackers solaires

Afin de permettre au tracker solaire d'être orienté de la façon la plus optimale, il est possible de le faire selon deux façons :

- Tracker à un seul axe : Il suit la course du soleil (l'azimut) d'est en ouest afin d'optimiser l'orientation des panneaux tout au long de la journée. [94]
- Tracker à 2 axes : Il prend également en compte l'incidence des rayons du soleil en modifiant la hauteur des panneaux. Il optimise à la fois l'orientation et l'inclinaison. Ils sont donc plus performants. [94]

Le mécanisme qui assure le suivi de l'orientation du soleil peut être de deux sortes [95] :

- Un mécanisme d'horlogerie : Ce système s'appuie sur des calculs effectués au préalable et sur les observations des années précédentes ; en un lieu donné, on va définir la meilleure exposition en prenant en compte les paramètres d'heure de la journée, de saison et de latitude.
- Un système d'asservissement : Ce mécanisme se fonde sur une sonde solaire et un algorithme, et permet de limiter l'écart entre l'ensoleillement maximum et l'ensoleillement véritablement reçu par les panneaux solaires.

Dans les deux cas, la puissance nécessaire pour mettre en œuvre le mécanisme ne représente pas un inconvénient car elle reste peu importante, de l'ordre de quelques watts à peine. [95]

II.4.2.2 Avantages et inconvénients des trackers solaires

L'utilisation d'un suiveur solaire permet [94] :

- D'obtenir un meilleur rendement sur une installation photovoltaïque. Avec un tracker solaire 1 axe, le rendement est supérieur de 25 % à 30 % par rapport à une installation classique orientée sud. Pour les suiveurs 2 axes, le rendement est supérieur de 40 % ;
- Il peut être utilisé avec des panneaux photovoltaïques comme avec les panneaux solaires thermiques ;
- Il est peu énergivore ;
- Il s'agit d'une structure indépendante qui ne demande pas des travaux à prévoir.

Malgré tous les avantages que présentent les suiveurs solaires, il y a quelques limites non négligeables à leur utilisation [94] :

- Leur coût reste important par rapport aux installations classiques ;
- Ils nécessitent une maintenance régulière ;
- Ils doivent impérativement être positionnés parallèles au sol lorsque le vent est fort.

II.4.3 Panneaux photovoltaïques munis d'un réflecteur solaire

Un panneau photovoltaïque muni d'un réflecteur solaire consiste à placer des miroirs (réflecteurs) à proximité des panneaux afin de rediriger les rayons solaires vers des capteurs solaires et les éclairer davantage, ce qui permet d'augmenter leur performance. Cependant les réflecteurs solaires peuvent parfois réduire le rendement des panneaux en raison de la forte hausse de leur température. [96]

Pour projeter la lumière sur les panneaux solaires à toute heure de la journée, le réflecteur de rayons est muni d'un programme informatique autonome. Le miroir suivra le parcours du soleil avec l'aide d'un logiciel programmé à exécuter cette tâche. [96]



Fig.II.34 : Panneaux photovoltaïques à réflecteur solaire. [97]

II.4.4 Domotique solaire photovoltaïque agricole

La domotique est l'ensemble des dispositifs électriques qui permettent de contrôler en un seul endroit la gestion des équipements et des services. Il s'agit de piloter à distance et d'automatiser certaines fonctionnalités. La domotique peut ainsi être associée au fonctionnement des panneaux photovoltaïques afin d'optimiser son autoconsommation solaire. [98]

La domotique solaire va permettre d'utiliser le plus possible l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques, car l'électricité la moins chère est celle produite directement. [98]

Dans le monde agricole, les solutions de la domotique prennent la forme de capteurs reliés à Internet pour collecter des mesures environnementales et mécaniques. Leur déploiement permet aux agriculteurs d'avoir un meilleur contrôle sur le processus d'élevage et de culture, ce qui le rend plus prévisible et améliore son efficacité.[99]

Grâce à un boîtier connecté à des prises intelligentes, la domotique analyse la production d'électricité des panneaux solaires en temps réel et pilote l'attribution de l'énergie et le fonctionnement des différents appareils électriques et électroménagers. Pour cela, le dispositif domotique est installé sur-mesure, car programmé en fonction des caractéristiques du bâtiment et ses besoins énergétiques. [98]

Les différents systèmes de domotique solaire se composent de plusieurs appareils [99] :

- Une box de pilotage qui gère les appareils électriques et rassemble les données de production et consommation ;
- Des pinces ampèremétriques qui récupèrent et transmettent en temps réel les données de production des panneaux solaires ;
- Des prises intelligentes qui permettent à la box domotique solaire de récupérer les données de consommation des appareils électriques et de les piloter à distance ;
- Un thermostat connecté qui permet d'adapter le chauffage du logement en fonction des données météorologiques ou du panneau solaire.

Les données prises en compte par la domotique pour améliorer l'autoconsommation solaire sont [98] :

- Les coûts de l'électricité selon les heures ;
- La courbe de production des panneaux photovoltaïques ;
- La courbe estimative de la production des panneaux photovoltaïques (données météorologiques) ;
- Les données d'utilisation des appareils connectés (fréquence et temps d'utilisation) ;
- Les paramètres de confort (température souhaitée, etc.).

Pour le secteur agricole, la domotique peut améliorer plusieurs activités telles que [99] :

- Collecte de données : Les capteurs agricoles intelligents peuvent collecter des données sur les conditions météorologiques, la qualité du sol, la progression de la croissance des cultures ou la santé du bétail. Ces données peuvent être utilisées pour suivre l'état de l'exploitation en général ainsi que les performances du personnel, l'efficacité des équipements, etc ;
- Meilleure gestion des rendements : La capacité à prévoir le rendement de la production agricole permet de planifier une meilleure distribution des produits, afin de déterminer la quantité nécessaire des produits et d'éviter le stock des produits invendus ;
- Meilleure gestion des coûts : Le repérage des anomalies dans la croissance des cultures ou la santé du bétail permet de faire des économies ;
- Augmentation de l'efficacité : En utilisant des appareils intelligents, on peut automatiser plusieurs processus tout au long du cycle de production, par exemple, l'irrigation, la fertilisation ou la lutte antiparasitaire ;
- Amélioration de la qualité des produits et des volumes : L'automatisation des processus permet un meilleur contrôle du processus de production, ainsi que le maintien de la qualité des cultures et de la capacité de croissance.

II Conclusion

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque joue un rôle incontournable pour une autoconsommation d'une ferme agricole, dont l'objectif est d'optimiser sa performance et sa productivité.

Ce chapitre représente un état de l'art sur le système solaire photovoltaïque, ses types et composants, ainsi leurs applications dans diverses exploitations agricoles.

Il aborde également les différentes technologies liées à l'énergie photovoltaïque en faveur du secteur agricole, à l'instar des nouvelles générations de chaque élément d'un système autonome, ainsi des technologies et techniques auxiliaires qui favorisent le développement des fermes offrant des perspectives vers une ferme intelligente et durable.

Chapitre III

*Étude et dimensionnement
d'une installation
photovoltaïque dans
le secteur agricole*

III Introduction

La hausse demande de l'énergie électrique et la difficulté de l'accès au réseau électrique font partie des principales préoccupations du secteur agricole, afin de subvenir aux besoins énergétiques des différents taches et activités effectuées au niveau de la ferme.

De ce fait, l'adoption d'une source énergétique renouvelable présente une solution fiable et sure pour réaliser l'autoconsommation de la ferme. Le pompage solaire constitue une technologie prometteuse pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau, qui continuera de prendre de l'ampleur au cours des années à venir. Toutefois, le dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service reste toujours un processus relativement complexe à résoudre en raison de nombreux paramètres à prendre en considération.

Dans le présent chapitre, l'étude se portera sur le dimensionnement d'une installation du pompage solaire à l'aide du logiciel PVsyst, qui a pour avantage de faire une analyse et évaluation technico-économique du système au niveau de la ferme.

III.1 Présentation du logiciel PVsyst

PVsyst est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. [100]

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement. Le premier est une application de prédimensionnement assez simple à prendre en main. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. De plus, il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général. [100]

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on entre les données concernant l'installation, vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent. [100]

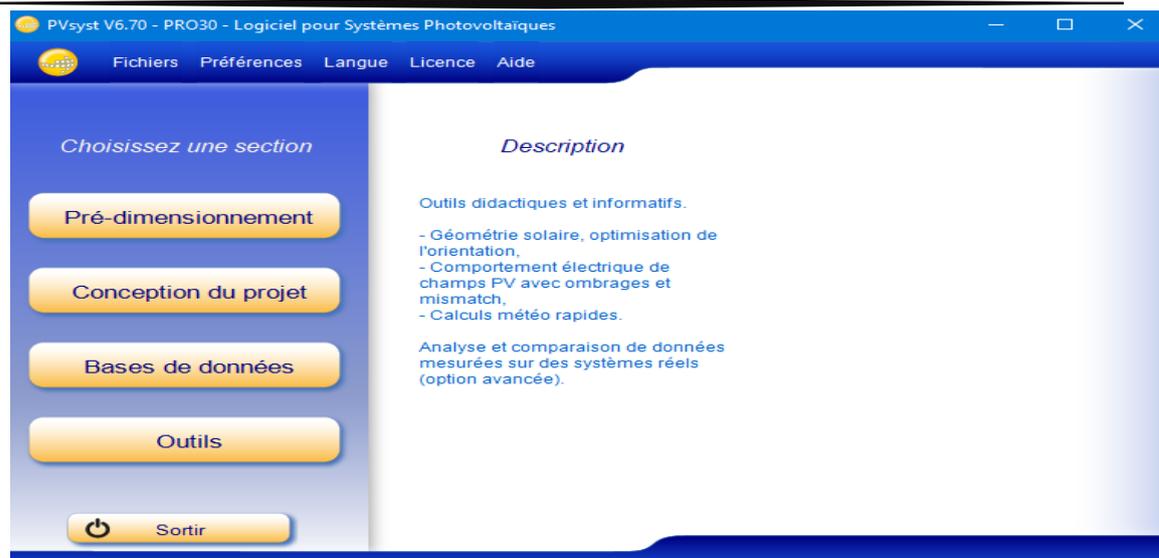


Fig.III.1 : Sections du logiciel PVsyst V6.7.

Le logiciel PVsyst offre la possibilité de choisir une section parmi les quatre sections suivantes :

- Pré dimensionnement : fournit une évaluation rapide des potentiels et des contraintes éventuelles d'un projet dans une situation donnée. Le logiciel calcule quelques paramètres de pré dimensionnement ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût. [100]
- Conception du projet : est la partie principale du logiciel et est utilisé pour l'étude complète d'un projet. Elle implique le choix des données météorologiques, la conception du système, les études d'ombrage, la détermination des pertes et l'évaluation économique. La simulation est effectuée sur une année complète, par étapes horaires, et fournit un rapport complet et de nombreux résultats supplémentaires. [101]
- Bases de données : comprennent la gestion des données climatiques qui consistent en des données mensuelles et horaires, la génération synthétique de valeurs horaires et l'importation de données externes. Les bases de données contiennent également les définitions de tous les composants impliqués dans les installations PV, comme les modules, les onduleurs, les batteries, etc. [101]
- Outils : cette section fournit quelques outils supplémentaires pour estimer et visualiser rapidement le comportement d'une installation solaire. Il contient également un ensemble d'outils dédiés qui permettent d'importer les données mesurées d'installations solaires existantes pour une comparaison étroite avec la simulation. [101]

III.1.1 Dimensionnement d'une installation du pompage solaire à l'aide du logiciel PVsyst V6.7

Le logiciel PVsyst V6.7 permet de faire une étude approfondie et de faisabilité d'une installation du pompage photovoltaïque.

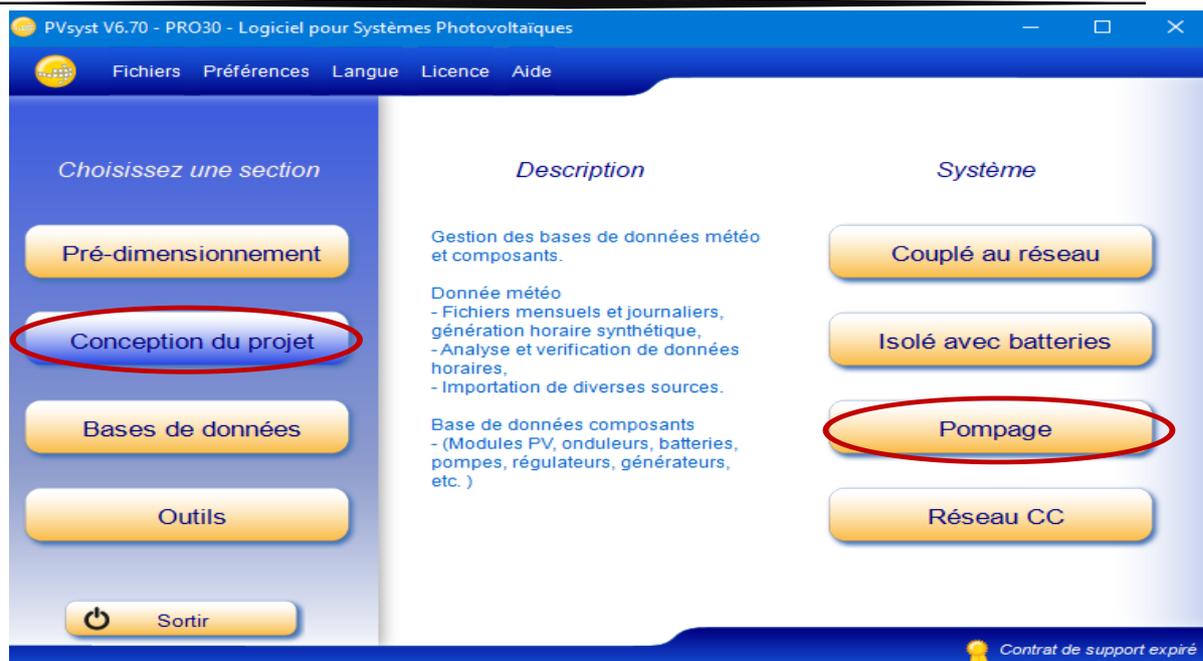


Fig.III.2 : Conception d'un projet du pompage solaire dans le logiciel PVsyst V6.7.

Les systèmes de pompage dans PVsyst ne concernent que les systèmes de pompage isolés, qui fonctionnent selon la disponibilité du soleil, sans stockage électrique. Un tel système est composé d'une (ou plusieurs) pompe(s), d'une matrice PV et d'un contrôleur/conditionneur d'énergie (très exceptionnellement une batterie d'appoint).

La mise en œuvre de tels systèmes implique une définition détaillée du circuit hydraulique (type de système tel que puits profond, pompage dans un lac ou équivalent, ou système de pressurisation) et des besoins de l'utilisateur, de la hauteur de chute (en fonction du débit et d'éventuels autres paramètres), des besoins en eau, et d'un réservoir de stockage.

Le mode de fonctionnement en fonction de la disponibilité du soleil implique que la pompe fonctionnera à une puissance imposée par la puissance maximale du générateur PV à un moment donné. Comme la hauteur de charge est imposée par des conditions externes (différence de niveau, perte de charge dans les tuyaux, rabattement dans un puits profond, etc.), le débit résultant sera directement lié à la disponibilité instantanée de la puissance. La simulation nécessite donc un modèle complet du comportement de la pompe, donnant le débit résultant dans toutes les conditions de puissance et de hauteur. Le point de fonctionnement, dépendant des variations de la hauteur totale en fonction du débit (pertes de charge des canalisations, niveau de rabattement) sera évalué par approximations successives.

Le logiciel PVsyst V6.7 considère le système de pompage comme une charge au même titre que toute autre charge, Il ne propose pas d'évaluation de l'eau pompée, ni aucun autre paramètre/résultat concernant la partie hydraulique. [102]

III.1.1.1 Identification du projet

Pour identifier un projet sur PVsyst V6.7, on doit passer par les deux étapes suivantes :

- **Étape 1** : Définition du nom du fichier et du nom du projet.

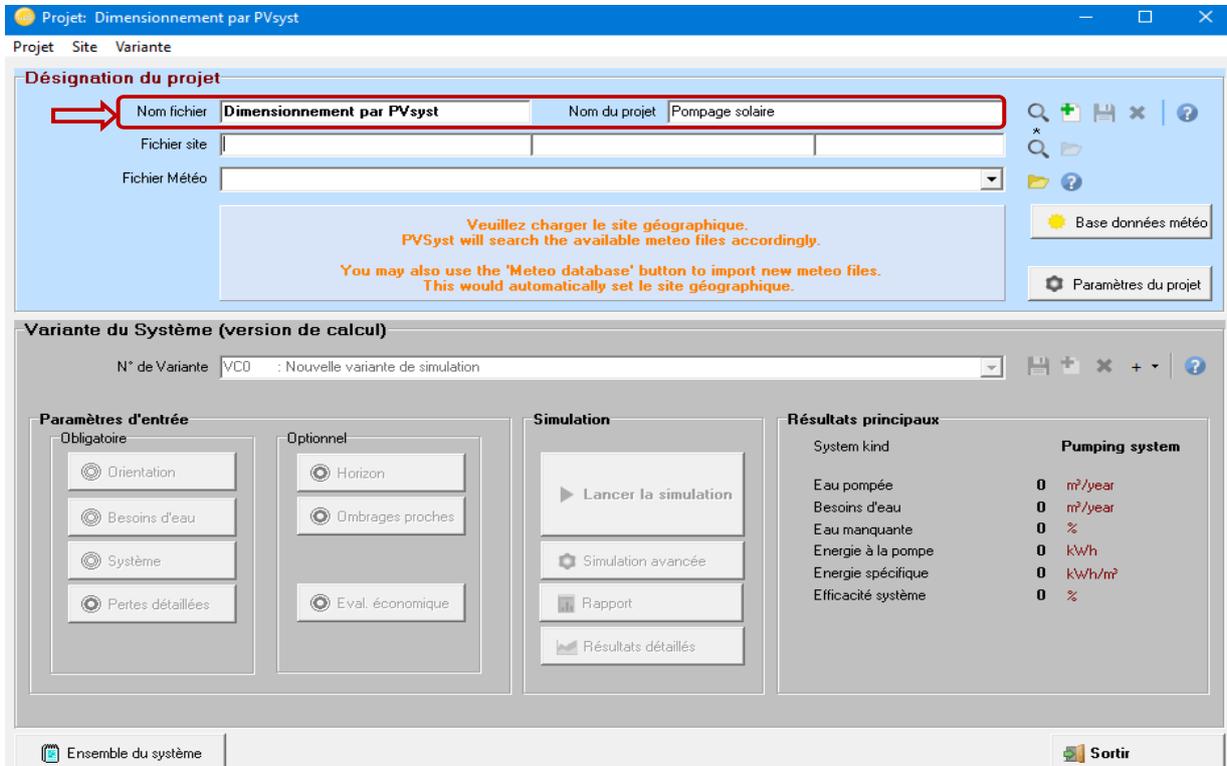


Fig.III.3 : Définition du nom du fichier et du nom du projet.

- **Étape 2** : Définition du site du projet. Cette étape peut se faire selon 2 méthodes ; soit on cherche le site sur la liste des sites géographiques prédéfinis dans le logiciel par l’insertion de son nom (voir fig.III.5), ou bien en entrant le lieu les coordonnées géographiques du site à étudier à savoir la latitude, la longitude at l’altitude (voir fig.III.6 et fig.III.7).

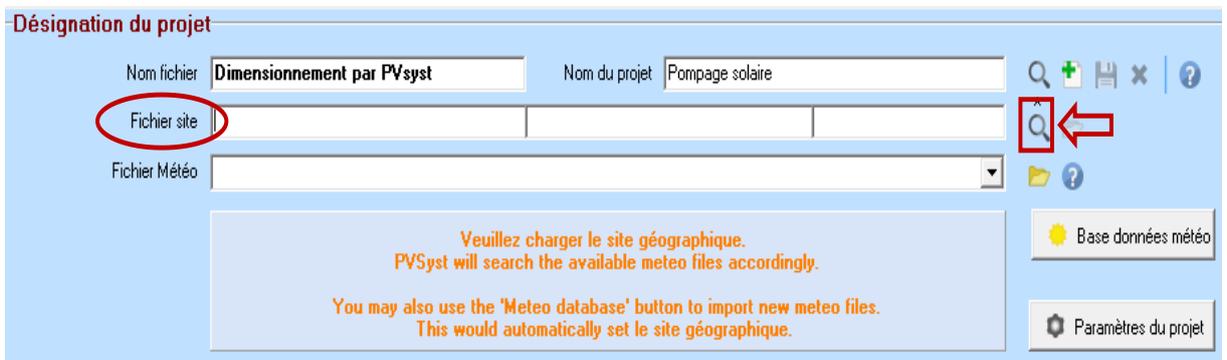


Fig.III.4 : Définition du site du projet.

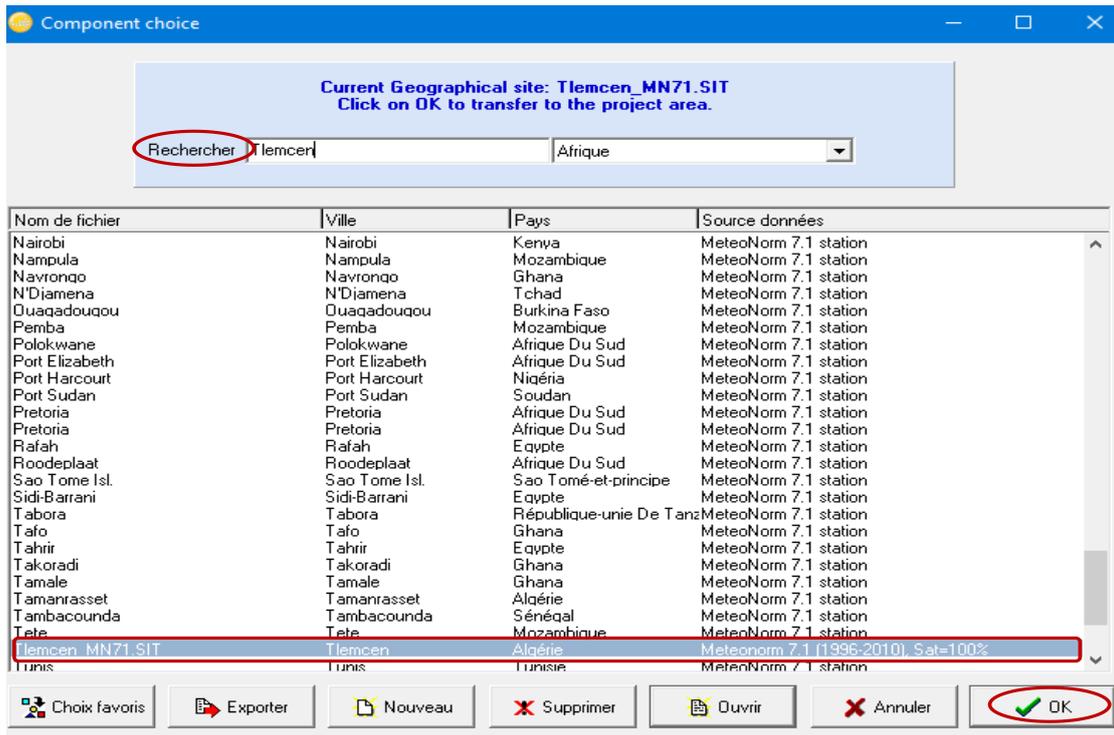


Fig.III.5 : Identification du site du projet sur la liste des sites prédéfinis.

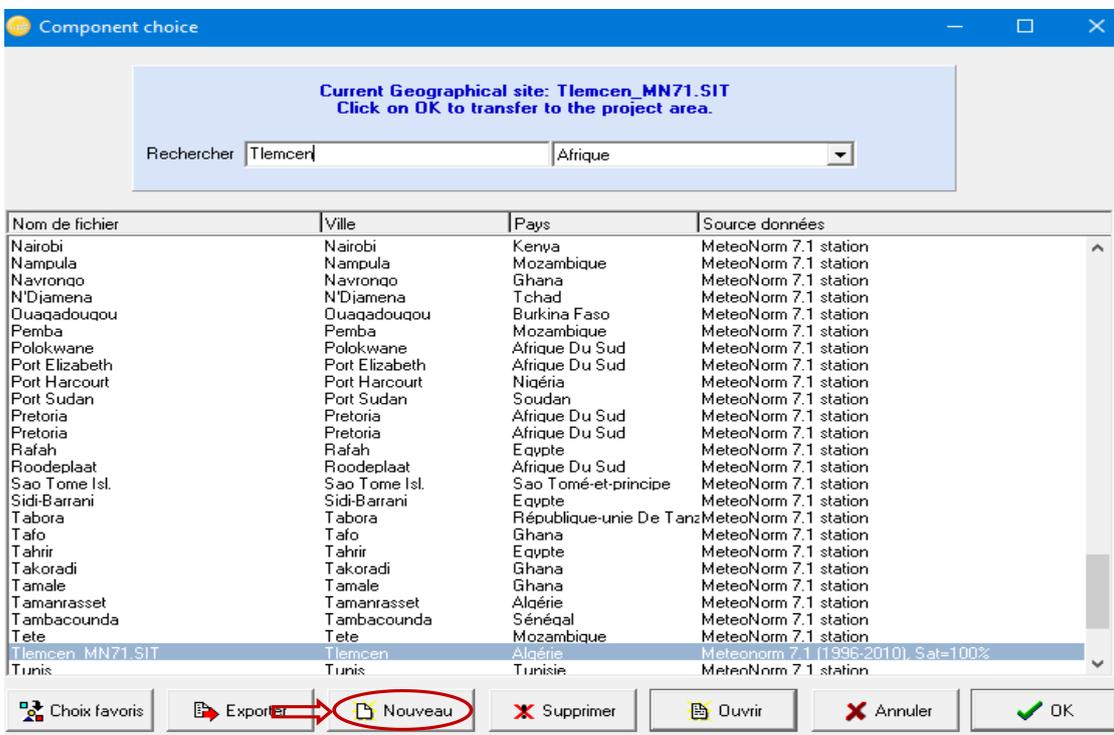


Fig.III.6 : Identification d'un site indéfini sur la liste des sites géographies prédéfinis.

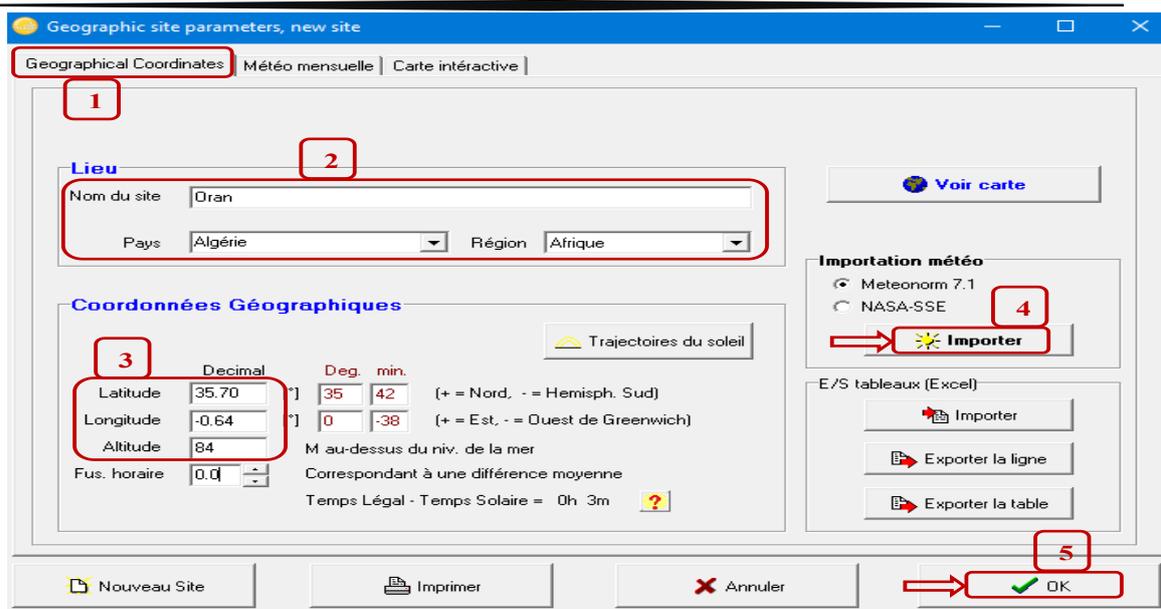


Fig.III.7 : Identification du lieu et des coordonnées géographiques du site du projet.

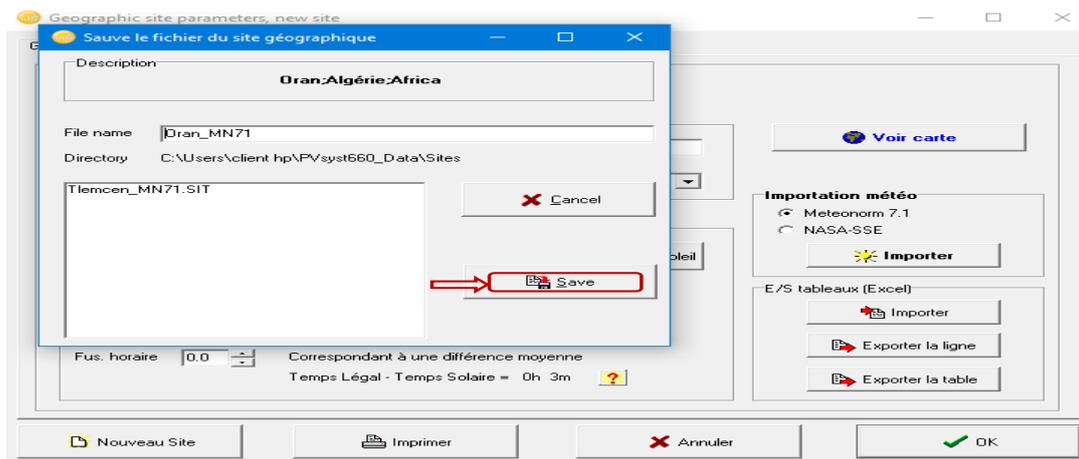


Fig.III.8 : Enregistrement du fichier du site du projet.

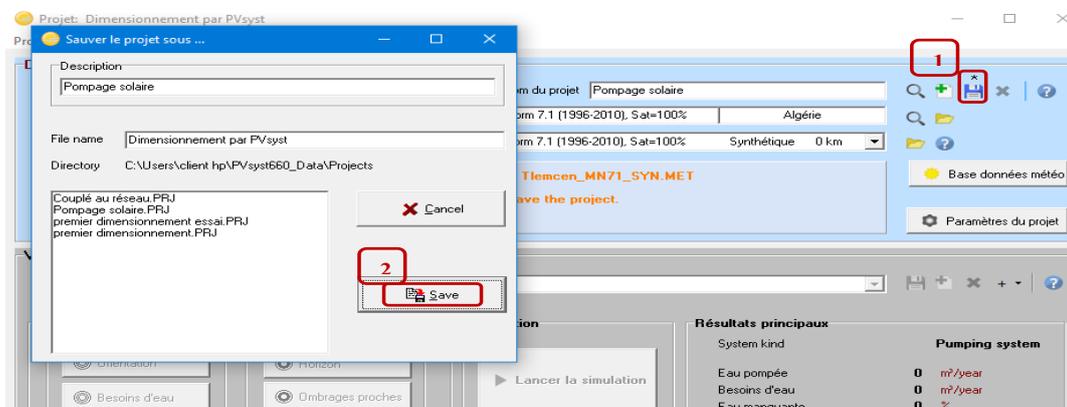


Fig.III.9 : Enregistrement du fichier du projet.

III.1.1.2 Orientation des panneaux photovoltaïques

La couleur rouge signifie que cette variante du projet n'est pas encore prête pour la simulation : des données supplémentaires sont nécessaires. Les paramètres de base qui doivent être définis pour toutes les variantes et qui ne sont pas encore spécifiés sont l'orientation des panneaux solaires, les besoins en eau, le type et le nombre de modules PV, le type et le nombre de pompes qui seront utilisées. [103]

On commence de la première variante par l'identification de l'orientation du champ photovoltaïque, qui visant à montrer l'orientation la plus appropriée pour un système photovoltaïque.

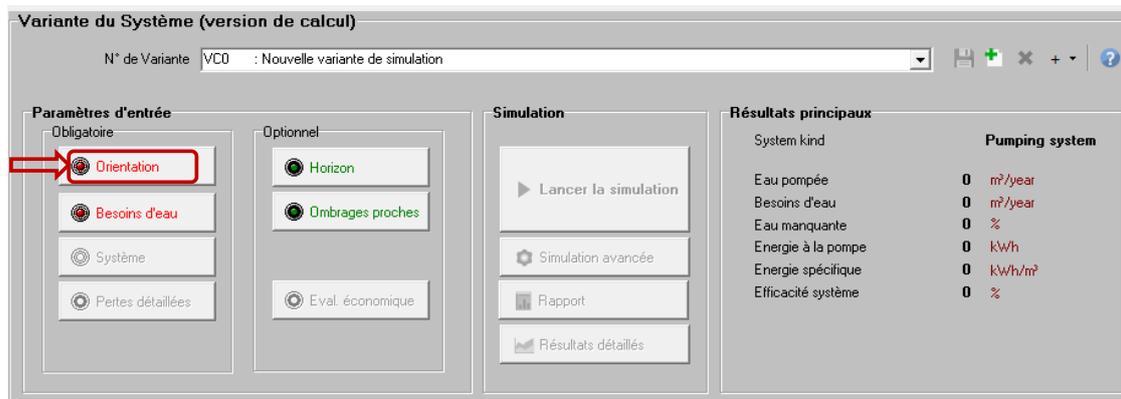


Fig.III.10 : Orientation des panneaux photovoltaïques.

PVsyst supporte les simulations avec de nombreux modes d'orientation du plan tels que [102] :

- Plan incliné fixe : Il suffit de définir l'inclinaison et l'azimut du plan ;
- Multi-orientations : Il permet de définir des plans PV pour un maximum de 8 orientations différentes ;
- Réglage de l'inclinaison saisonnière : l'inclinaison du plan peut être réglée avec deux valeurs, pour les mois choisis d'hiver et d'été ;
- Plans suiveur un axe : Il permet de suivre le soleil selon un axe vertical ou un axe horizontal ;
- Plan suiveur deux axes : Il permet de suivre le soleil selon l'axe vertical et horizontal.

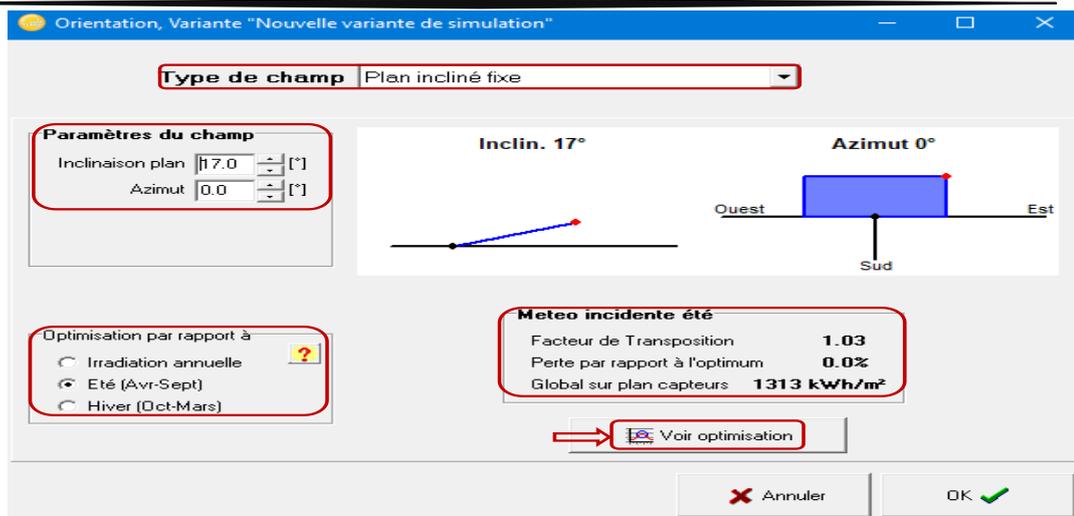


Fig.III.11 : Identification des différents paramètres pour l'orientation des panneaux photovoltaïques.

Après avoir choisi un champ plan incliné fixe, on identifie l'orientation des panneaux photovoltaïques selon la période souhaitée (année, hiver ou été). Ensuite on modifie les paramètres du champ (inclinaison plan et azimut) pour une meilleure valeur possible de l'irradiance incidente sur le plan et une faible valeur possible de perte par rapport à l'optimum. Le facteur de transposition traduit la variation d'énergie incidente dans un plan incliné par rapport à l'énergie incidente dans un plan horizontal.

L'optimisation de l'orientation du champ photovoltaïque se manifeste clairement sur les graphes résultants en cliquant sur « voir optimisation ».

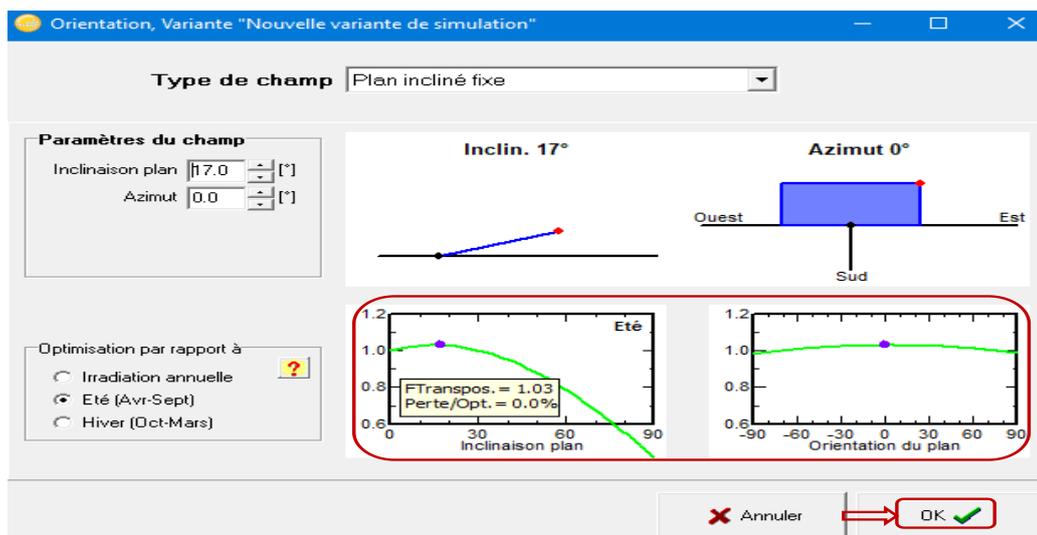


Fig.III.12 : Graphes du facteur de transposition en fonction de l'inclinaison et de l'orientation du plan.

III.1.1.3 Définition des besoins en eau

Dans ce paramètre d'entrée on doit définir les besoins en eau passant par le circuit hydraulique du pompage, les besoins en eau et pression.



Fig.III.13 : Définitions des besoins en eau.

III.1.1.3.1 Circuit hydraulique du pompage

Une fois que le menu "Besoins en eau" est ouvert, On doit définir les paramètres suivants [102],[103] :

- Le type du système de pompage :
 - Puits vers réservoir ;
 - Lac ou rivière vers réservoir ;
 - Pressurisation ;
- Caractéristiques du puits :
 - Niveau statique (static depth) : correspond à la profondeur du niveau d'eau dans le puits, en l'absence de tout système de pompage ;
 - Profondeur maximale de pompage (max pumping depth) : correspondant au niveau maximal de l'aspiration de l'eau ;
 - Profondeur de la pompe (pump depth) : elle doit être supérieure à la profondeur maximale de pompage, afin d'éviter un fonctionnement à sec de la pompe ;
 - Diamètre du puits (borehole diameter) ;
 - Rabattement spécifique (specific drawdown) : il s'agit d'une caractéristique du forage et du sol environnant (peut rester à 0 si on n'a pas d'information sur ce paramètre) ;
- Caractéristiques du réservoir de stockage :
 - Volume de stockage du réservoir ;
 - Diamètre du réservoir : s'il est rectangulaire, le diamètre se calcule par la relation suivante :

$$\text{Diamètre} = \sqrt{\frac{\text{longueur} * \text{largeur} * 4}{3,14}}$$

- La hauteur de l'eau dans le réservoir lorsqu'il est plein (water full height) : elle se calcule automatiquement par le logiciel ;
- Le mode d'alimentation : il s'agit de la hauteur d'injection de l'eau dans le réservoir, qui peut être soit une alimentation par le haut (dans ce cas, il faut définir l'altitude d'alimentation par rapport au sol), ou bien une alimentation par le bas (la sortie de la canalisation de pompage se fait au fond de la cuve) ;
- Caractéristiques du circuit hydraulique :
 - Choix de la tuyauterie (pipe choice) ;
 - Longueur de la tuyauterie (piping length) ;
 - Nombre de coudes (number of elbows) ;
 - Autres pertes par frottement (other friction losses) : les facteurs de perte de charge par frottement correspondent aux diverses singularités hydrauliques, vannes, etc. Ils doivent être maintenus négligeables aux débits nominaux du système, en choisissant un diamètre de tuyau approprié.

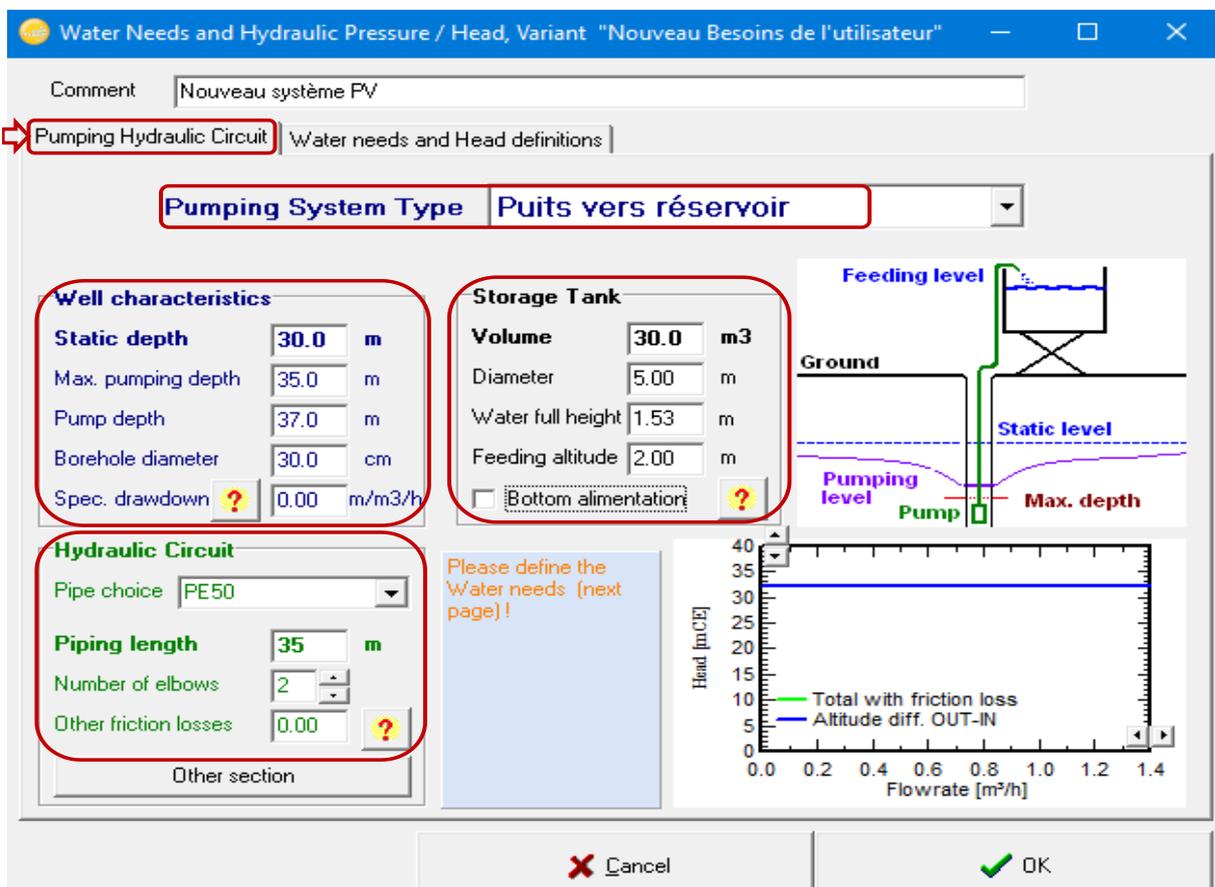


Fig.III.14 : Identification du circuit hydraulique du pompage.

III.1.1.3.2 Besoins en eau et pression

Les besoins en eau (volume d'eau pompée) peuvent être spécifiés annuellement (valeur constante), ou en valeurs mensuelles / saisonnières en m³/jour.

La valeur de la profondeur statique correspond à celle du niveau statique définie à la page précédente (circuit hydraulique du pompage). [103]

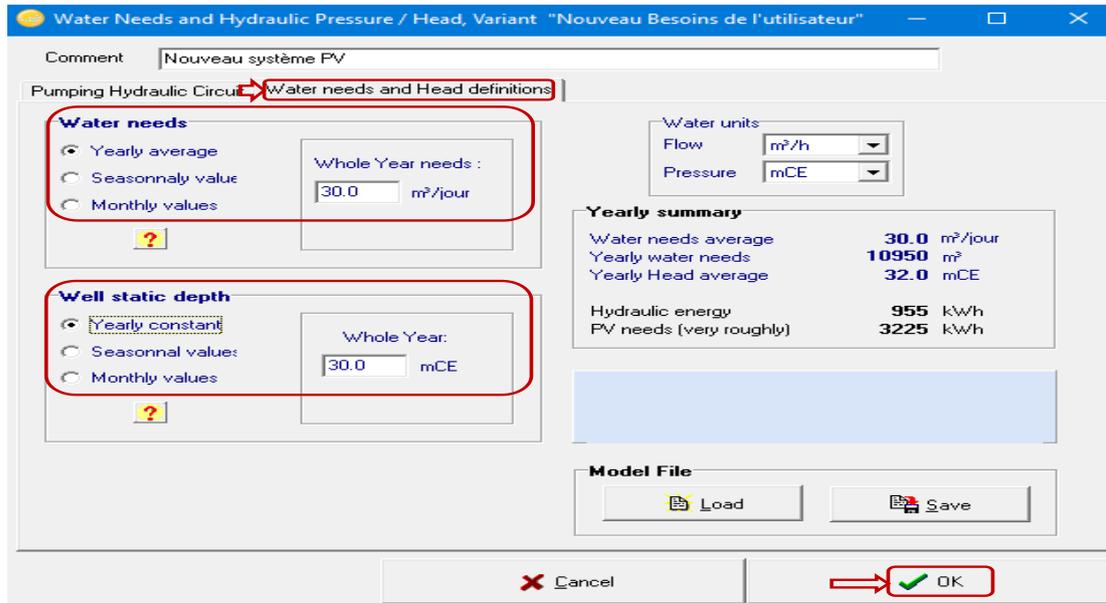


Fig.III.15 : Identification des besoins en eau et pression.

III.1.1.4 Définition des caractéristiques du système du pompage photovoltaïque

Dans ce paramètre d'entrée on doit définir les caractéristiques de la pompe, du champ photovoltaïque et du système de régulation du pompage.



Fig.III.16 : Définition des caractéristiques du système du pompage photovoltaïque.

III.1.1.4.1 Caractéristiques de la pompe

Dans la fenêtre de la définition des caractéristiques de la pompe, le logiciel offre la possibilité de choisir entre plusieurs fabricants de pompes en tenant compte le type de pompe (immergée ou de surface), le type du moteur de la pompe (à courant alternatif ou à courant continu, etc).

Pour choisir la pompe la plus adaptée aux caractéristiques du système, le logiciel effectue une présélection en fonction de la hauteur manométrique totale, le débit et la puissance. Les pompes en rouge ne sont pas compatibles avec les besoins, les pompes en orange sont compatibles mais ne répondent pas totalement aux besoins, les pompes en vert sont compatibles et optimales. [103]

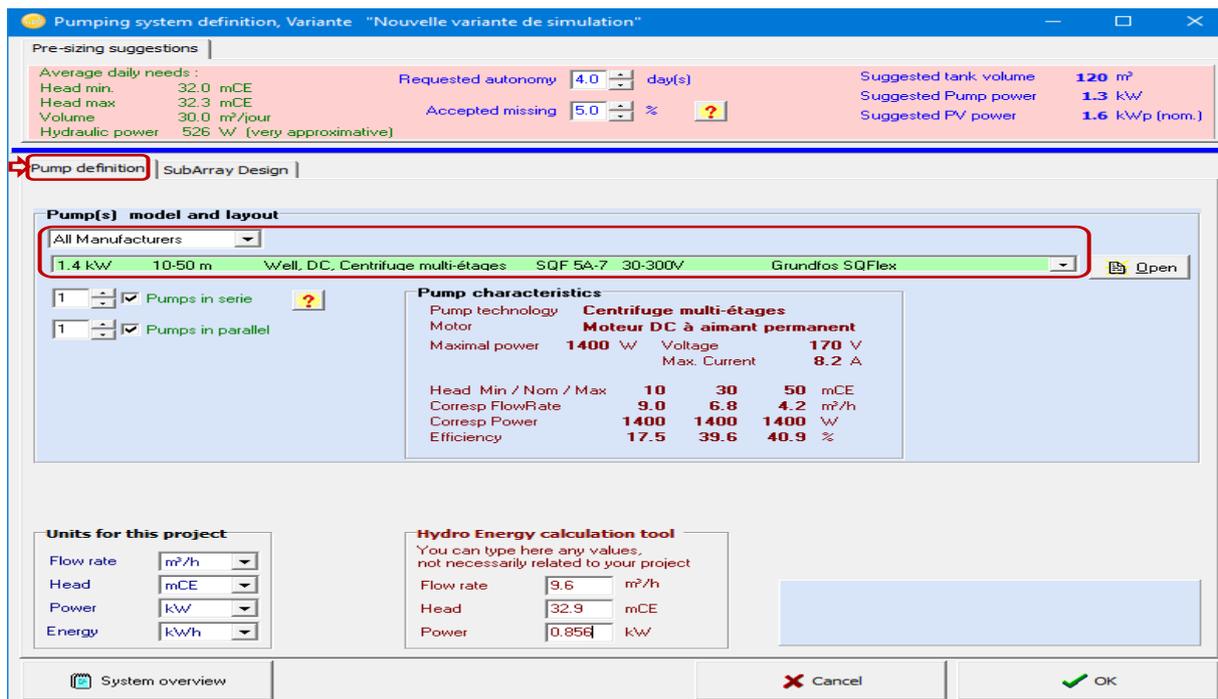


Fig.III.17 : Identification des caractéristiques de la pompe.

III.1.1.4.2 Conception du sous-champ

Dans la boîte de dialogue "Système", page "Conception du sous-champ", on doit choisir le module PV approprié selon les indications données par le logiciel (on suit également les couleurs vertes/oranges/rouges).

Ensuite on doit effectuer le choix du mode de régulation. Là encore, les couleurs vertes/oranges/rouges indiquent les choix appropriés, en fonction du type de système, du modèle de pompe et du nombre de pompes choisies précédemment. Une série de messages d'avertissement spécifiques explique les raisons des incompatibilités ou d'une mauvaise conception. La stratégie de régulation choisie fixe l'ensemble des dispositifs de contrôle disponibles. Le logiciel demande d'entrer en plus les paramètres de la batterie si on choisit un mode de contrôle avec batterie. [103]

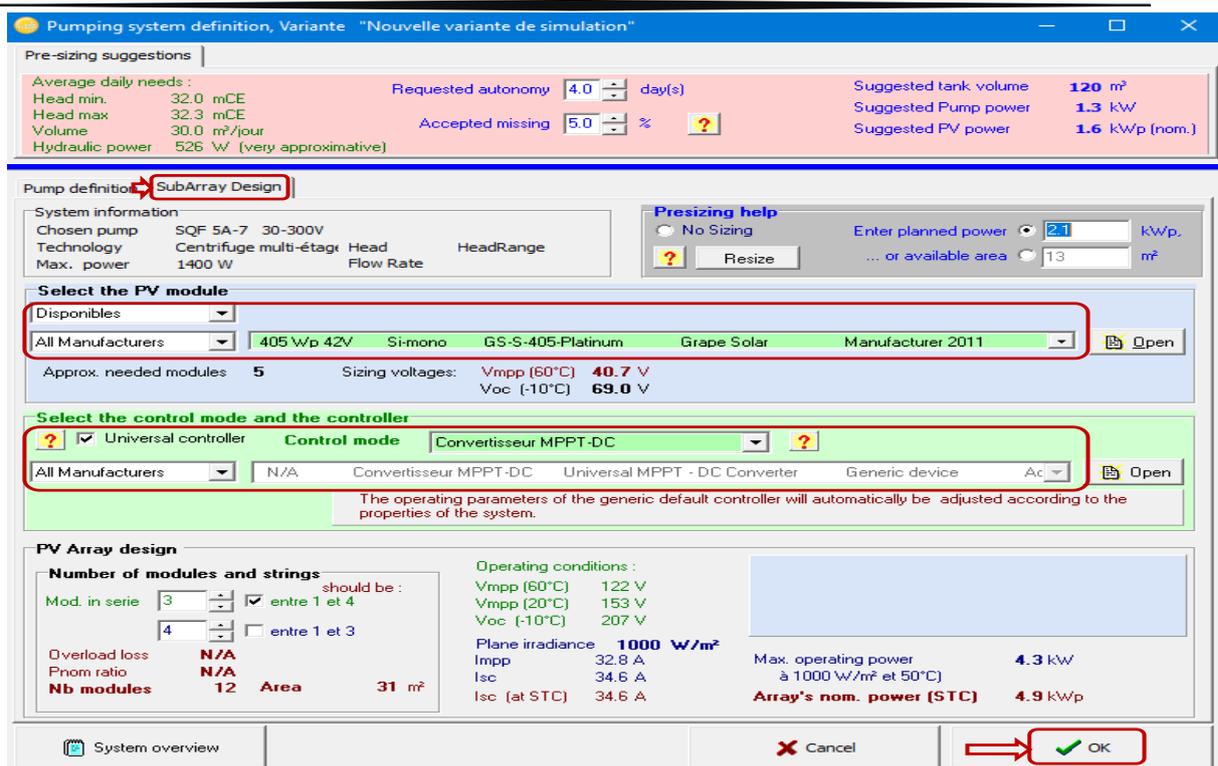


Fig.III.18 : Conception du sous-champ.

III.1.1.5 Exécution de la simulation

Sur le tableau de bord du projet, tous les boutons sont maintenant verts (éventuellement orange) ou éteints. Le bouton "Simulation" est activé, et on peut maintenant lancer la simulation. [103]

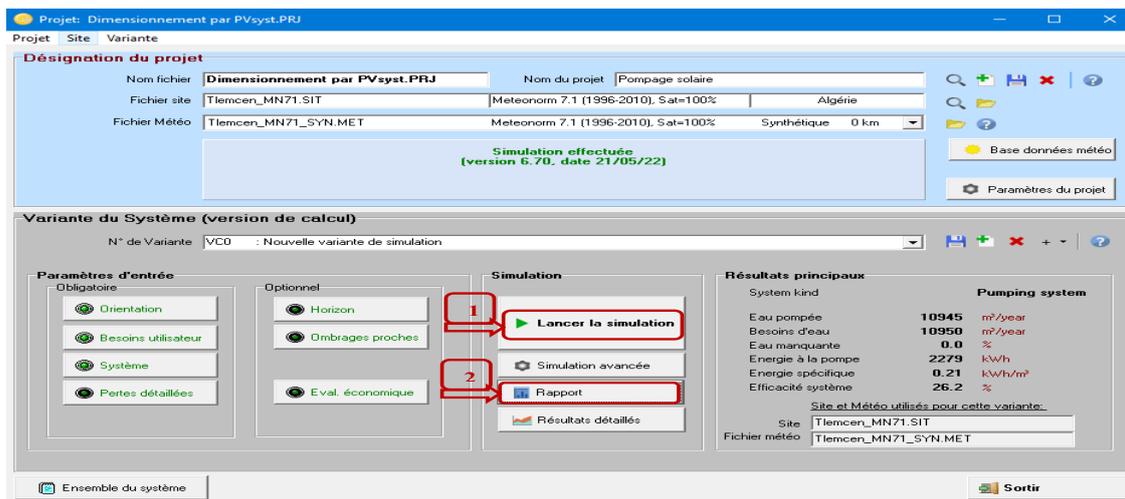


Fig.III.19 : Lancement de la simulation et exécution du rapport de la simulation.

En cliquant sur la barre « Rapport » le logiciel donne un rapport de simulation avec une description complète du système, avec tous les paramètres utilisés, les principaux bilans et résultats (fig.III.20)

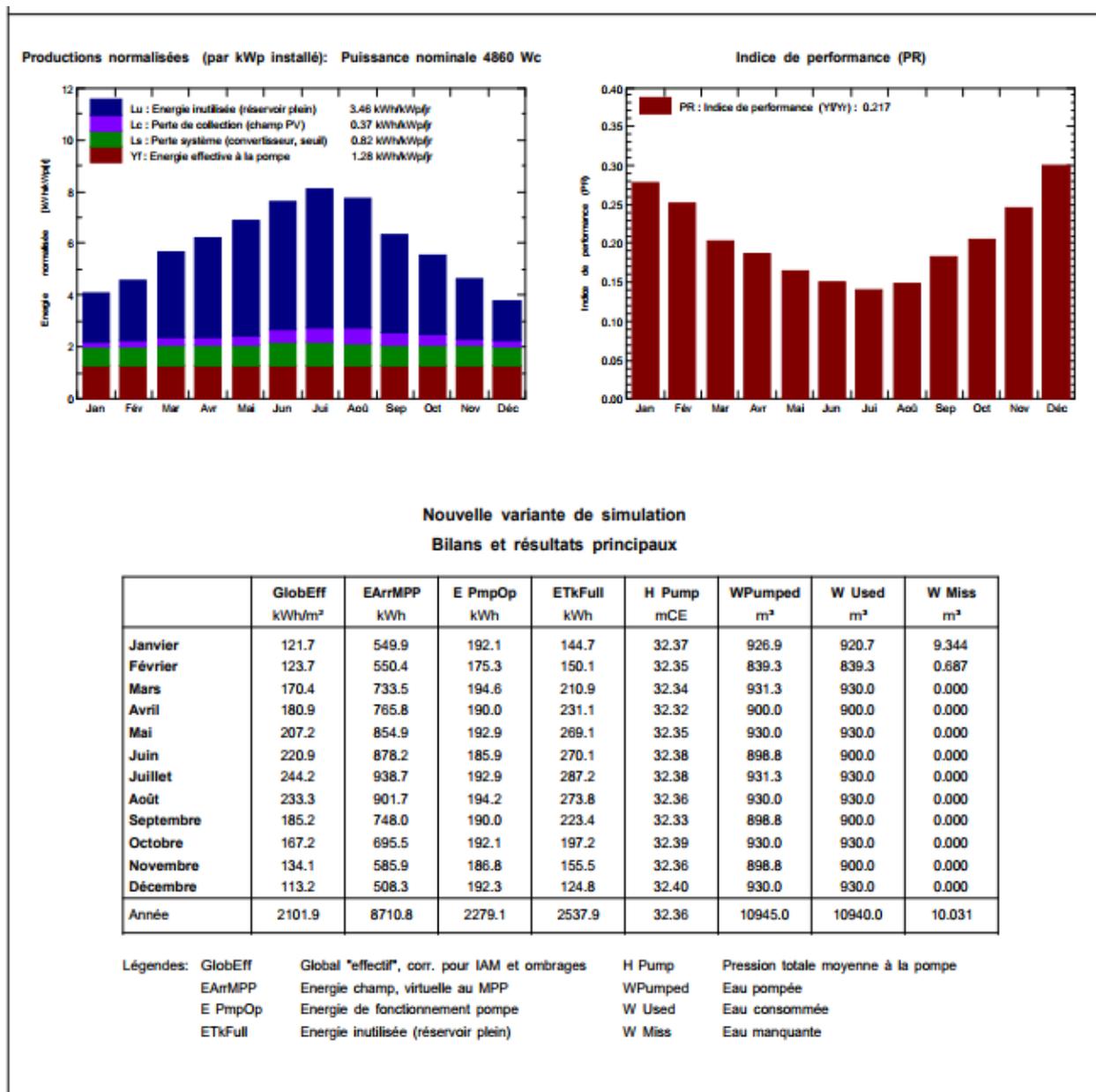


Fig.III.20 : Bilans et principaux résultats du rapport de simulation.

Le diagramme des pertes à la fin du rapport permet une analyse détaillée du fonctionnement réel du système durant l'année, et une vérification profonde de son dimensionnement (fig.III.21). [103]

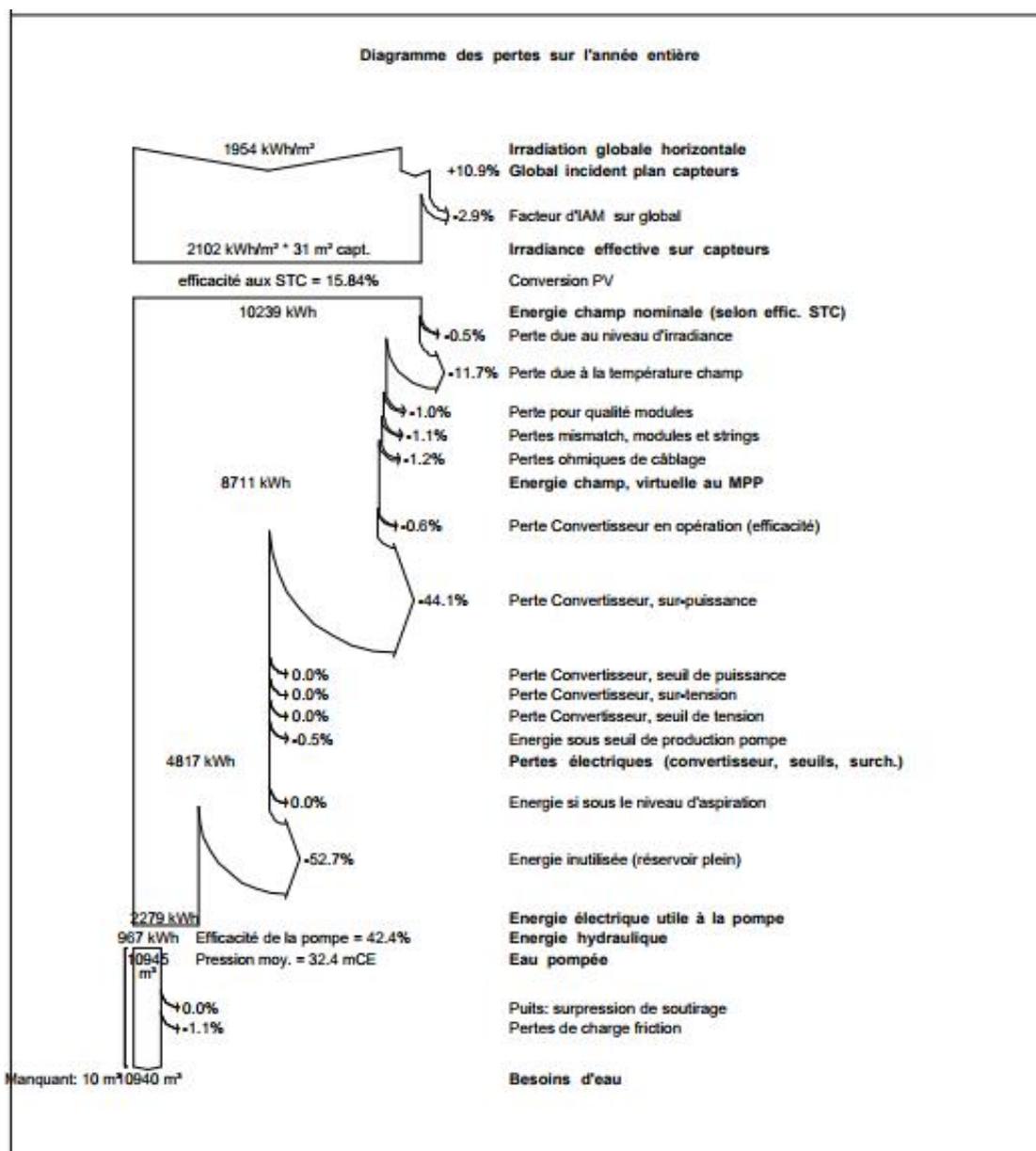


Fig.III.21 : Diagramme des pertes sur l'année entière.

Le logiciel permet également d'exécuter une évaluation économique du projet en entrant le cout d'investissement, les paramètres de financement et la durée de vie du projet.

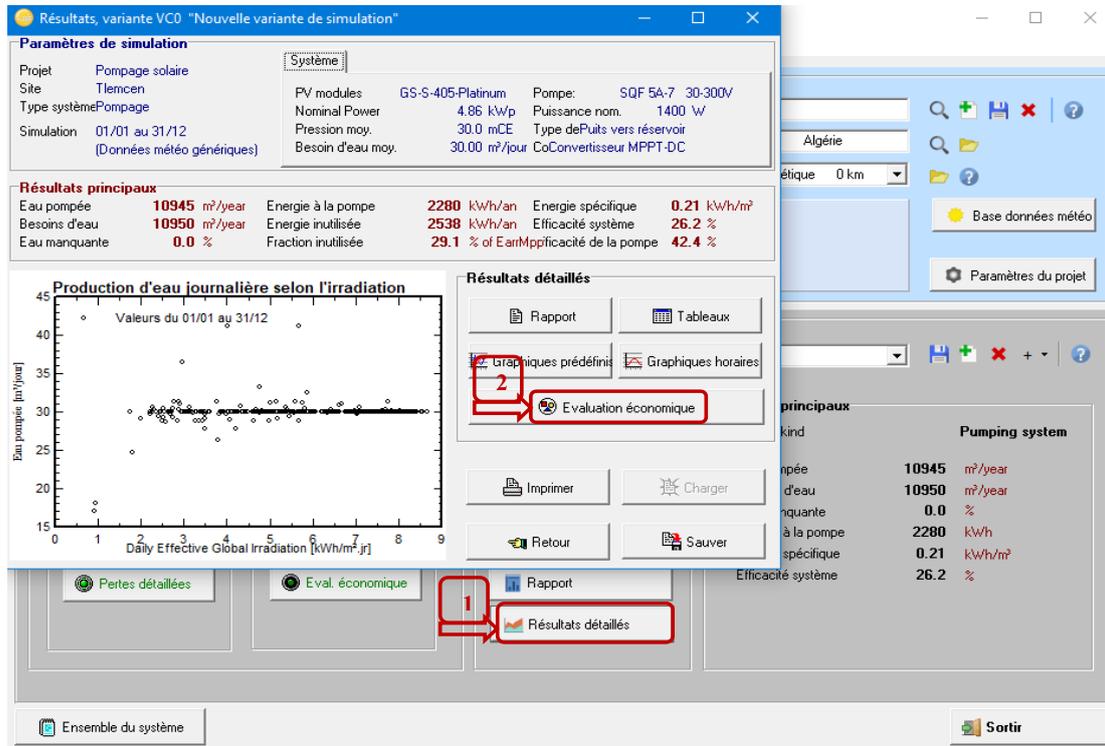


Fig.III.22 : Exécution de l'évaluation économique.

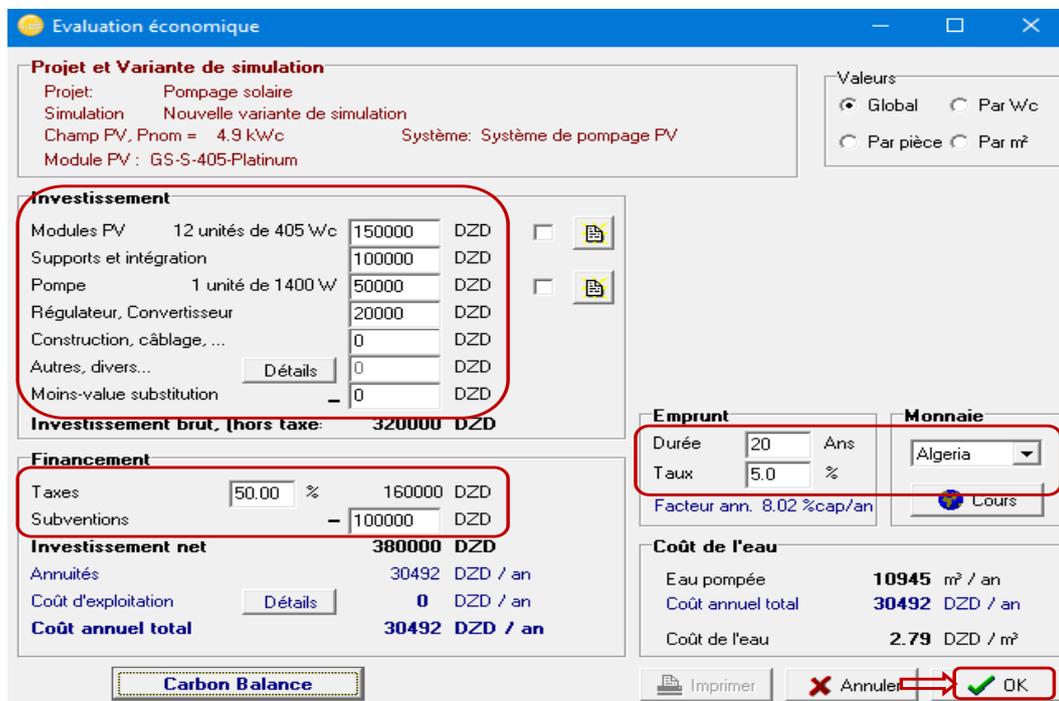


Fig.III.23 : Analyse et évaluation économique du projet dans le logiciel PVsyst V6.7.

La version 6.8 du logiciel PVsyst offre l'avantage de faire une évaluation économique détaillée du projet (fig.III.24).

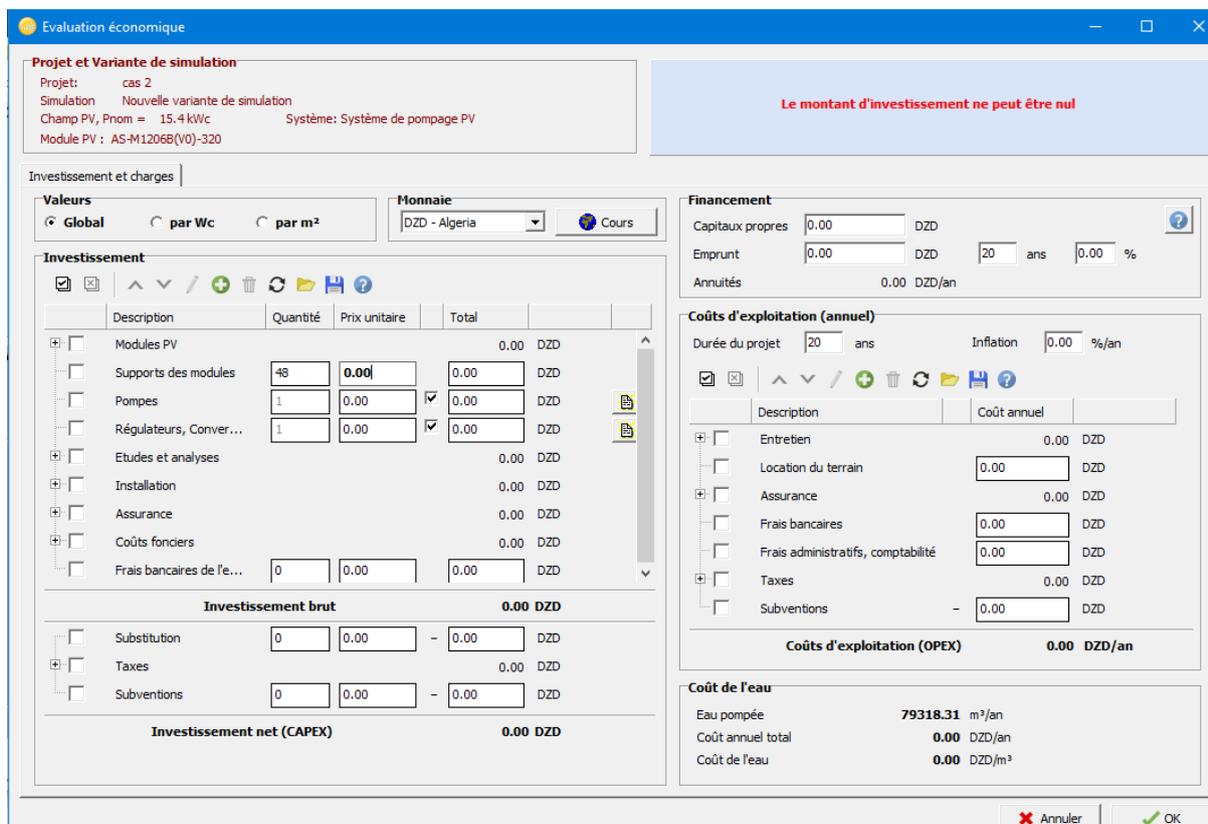


Fig.III.24 : Analyse et évaluation économique du projet dans le logiciel PVsyst V6.8.

III.2 Présentation de la ferme étudiée : L’EURL BELAIDOUNI Mohamed

L’EURL (l’entreprise unipersonnelle à responsabilité limitée) BELAIDOUNI Mohamed est une exploitation agricole, dépendant de la SAEX Ouest (société agricole d’exploitation), Filiale de l’ONCV (office national de commercialisation des produits vitivinicoles), est située dans la commune d’EL-Fehoul, Daïra de Remchi, Wilaya de Tlemcen.

Elle est délimitée au sud par la route nationale Ain Youcef et EL Fehoul, à l’ouest par des exploitation agricole privées, au nord et l’est par l’oued Isser.



Fig.III.25 : Site géographique de la ferme BELAIDOUNI.

- Les coordonnées géographiques de la ferme sont :

- ❖ Latitude : 35°6'10.79'' Nord
- ❖ Longitude : 1°18'46.15'' ouest

- Le terrain de la ferme est très légèrement en pente.

La ferme BELAIDOUNI Mohamed occupe une superficie agricole totale de 211.95 hectares, dont 174.5 hectares de surface agricole utile. Les superficies occupées par chaque culture sont données dans le tableau III.1 [104] :

Tab.III.1 : Occupation superficielle des différentes cultures de la ferme. [104]

Type	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Superficie agricole utile	174.5	100
Vignoble	95	54.5
Agrume	50	28.6
Plantations rustiques et d'olivier	10.8	6.2
Terres improductives	2.7	1.5
Fourrage, maraichage	16	9.2

III.2.1 Ressources en eau utilisées

Actuellement, les ressources hydriques pouvant être utilisées par l'EURL BELAIDOUNI Mohamed sont :

- Oued Isser avec un débit trop souvent aléatoire, mais constituant une ressource appréciable de novembre à Avril ;
- Source d'eau à sec avec un débit de 1 l/s. [104]

Actuellement, en raison du manque d'approvisionnement en eau pour l'irrigation, des travaux d'aménagement vont être mis en place pour forer un puits de 250 m de profondeur (altitude : 35°6'3,22'' Nord et longitude : 1°19'38,37'' Ouest), également pour construire un bassin de 250 m³ de volume et de 2 m de profondeur. La ferme dispose d'un bassin géomembrane de 5000 m³ de volume et 8 m de profondeur.

III.2.2 Le réseau d'irrigation

Selon nos enquêtes sur le réseau d'irrigation de la ferme étudiée, nous avons constaté que le type du système d'irrigation utilisé est par gravitation et aspersion avec une méthode d'arrosage à point (arrosage des plantes au besoin uniquement), en raison de la pénurie d'eau et de la grande superficie occupée par la ferme. Ainsi un système d'irrigation goutte à goutte présente une solution adéquate permettant d'économiser de l'eau à irriguer d'une part et d'assurer la meilleure croissance des plantes d'autre part.

Notre étude va se focaliser sur la viticulture, vu la disponibilité des données pour cette culture.

Les données des besoins en eau de la viticulture sont obtenues grâce à une étude menée par des ingénieurs spécialisés dans ce domaine.

▪ Besoins en eau de la viticulture en irrigation par aspersion

Tab.III.2 : Besoins en eau de la viticulture en irrigation par aspersion. [104]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nev	Déc
Besoins	-	-	-	0.80	1.70	3.50	5.24	5.4	4.00	2.00	0.30	-

D'après le tableau III.2, les mois de juin, juillet et aout présentent les périodes de pointe de consommation d'eau pour la culture du vignoble, avec une valeur de besoins en eau maximale de 5.4 mm/jour (54 m³/Ha/jour) en mois d'aout. [104]

▪ Besoins en eau de la viticulture en micro irrigation au goutte à goutte

L'irrigation localisée limite fortement la consommation de l'eau ; les pertes n'étant causées que par l'évapotranspiration des plantes. La valeur maximale des besoins en eau de la viticulture en micro irrigation au goutte à goutte est de 43.5 m³/Ha/jour. [104]

III.2.3 Système de pompage

La consommation énergétique du gasoil de la ferme BELAIDOUNI réside dans l'utilisation d'un système de pompage à moteur à essence.

Tab.III.3 : Consommation du gasoil pour les pompes d'irrigation.

Trimestres	Années					
	2019		2020		2021	
	Quantité (L)	Montant (DA)	Quantité (L)	Montant (DA)	Quantité (L)	Montant (DA)
1 ^{er} trimestre	8244,8	190125,088	14787,2	340992,832	9708	281629,08
2 ^{ème} trimestre	17799,2	410449,552	10336	271287,36	19732	572425,32
3 ^{ème} trimestre	17692,8	407995,968	16800	487368	5132	148879,32
4 ^{ème} trimestre	9551,2	220250,672	2000	348120	10480	304024,8
Total	53288	1228821,28	53923,2	1447768,192	45052	1306958,52

III.3 Dimensionnement de l'installation du pompage photovoltaïque au niveau de la ferme BELAIDOUNI

Le dimensionnement de l'installation du pompage photovoltaïque au niveau de la ferme BELAIDOUNI va aborder 3 différents scénarios, afin d'opter pour le meilleur scénario qui présente à la fois la meilleure performance et la meilleure rentabilité économique.

Pour tout ce qui suit l'amplitude du travail journalière est de 10 heures par jour (durant la journée) pour une irrigation de 5 hectares, avec un besoin en eau de 217.5 m³/jour, soit un besoin en eau de 43.5 m³/Ha/jour pour un réseau d'irrigation goutte à goutte.

Le dimensionnement des 3 scénarios se fait à l'aide du logiciel PVsyst version 6.8, car la version 6.7 ne permet pas de dimensionner une installation photovoltaïque supérieure à 13 KW.

III.3.1 Dimensionnement des installations du pompage solaire du premier scénario

Le premier scénario représente le dimensionnement des installations du pompage solaire qui est prévu à exécuter. Il comprend 3 installations de pompage solaire du forage vers la parcelle 2A suivant la figure III.26.

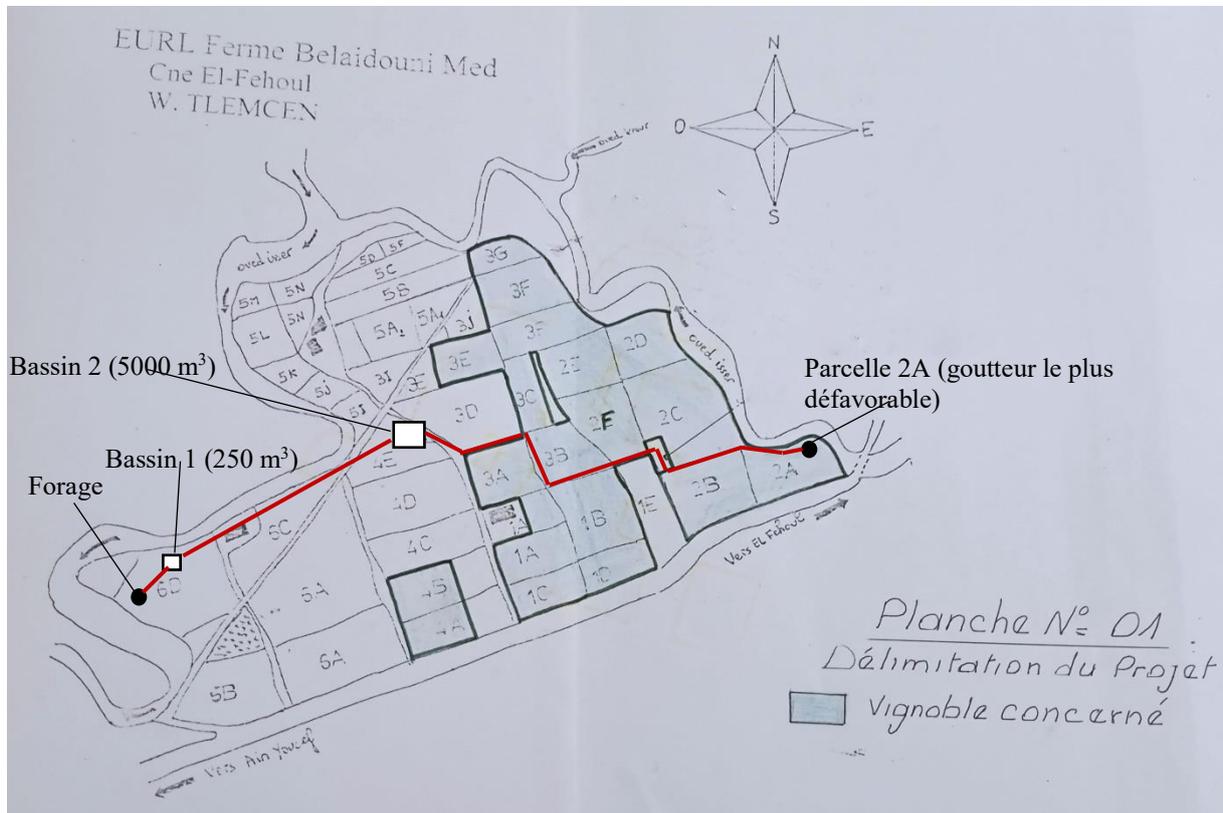


Fig.III.26 : Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du premier scénario. [104]

III.3.1.1 Dimensionnement de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1

Le bassin 1 est de 250 m^3 de volume avec une profondeur de 2 m. Pour le forage le niveau statique de l'eau, le niveau dynamique de l'eau et la profondeur de la pompe sont respectivement 85 m, 95 m et 105 m avec un diamètre de 50 cm.

La distance entre le forage et le bassin 1 est de 12 m, avec une pente de 1 m.

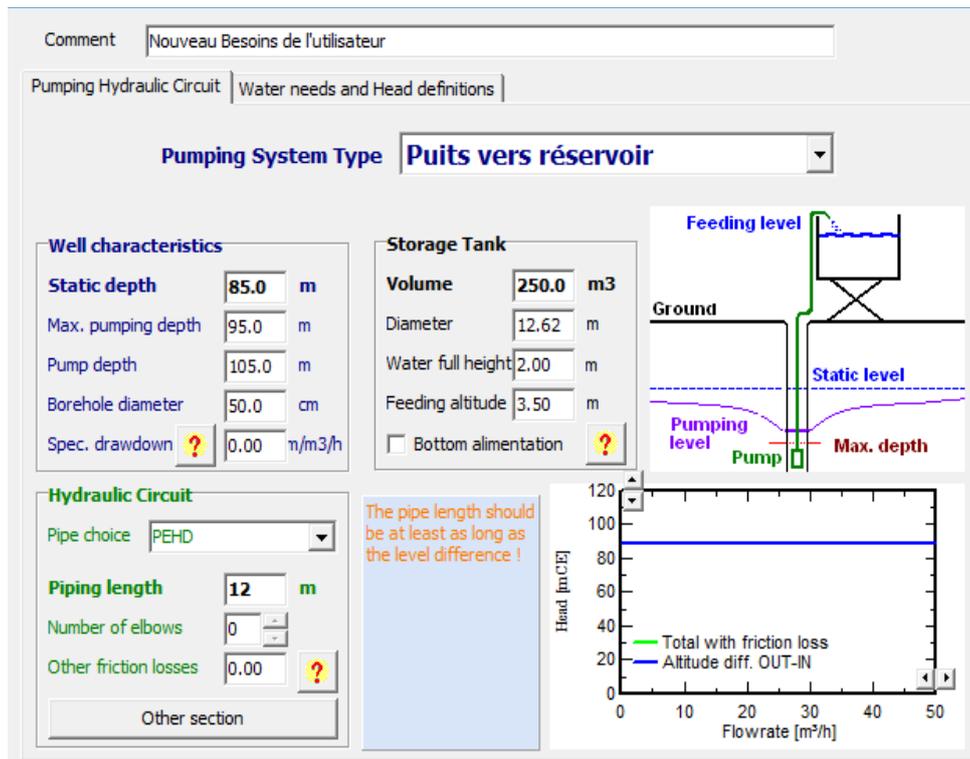


Fig.III.27 : Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

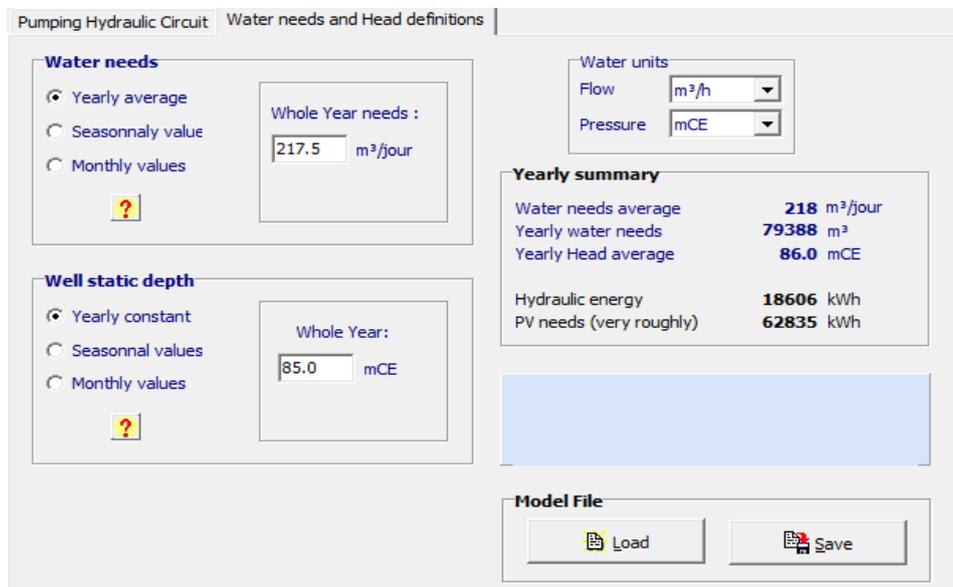


Fig.III.28 : Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

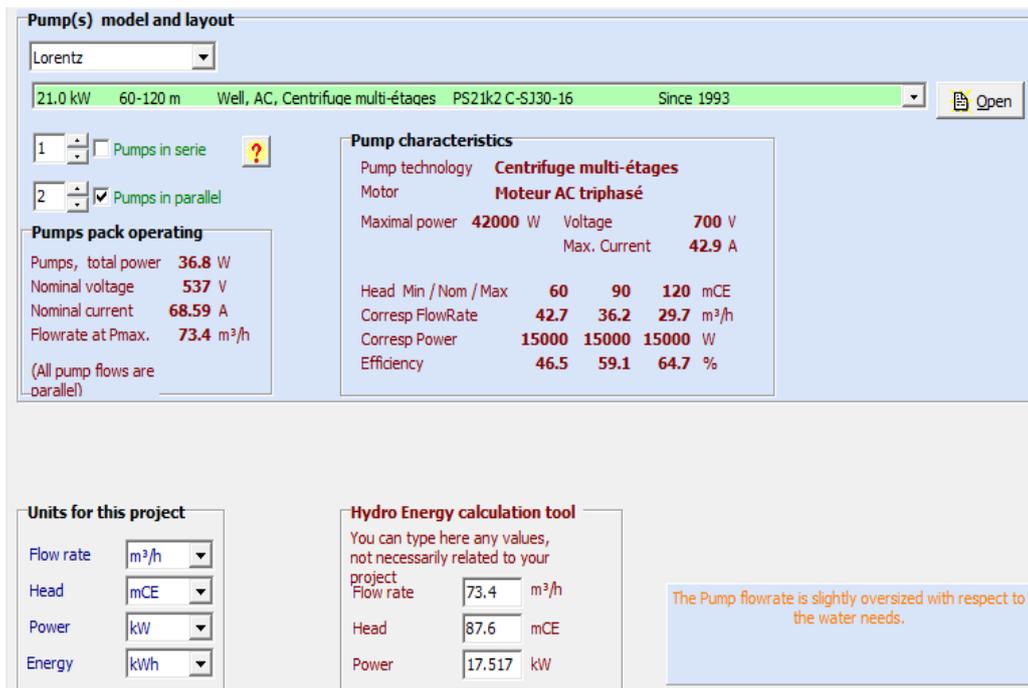


Fig.III.29 : Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

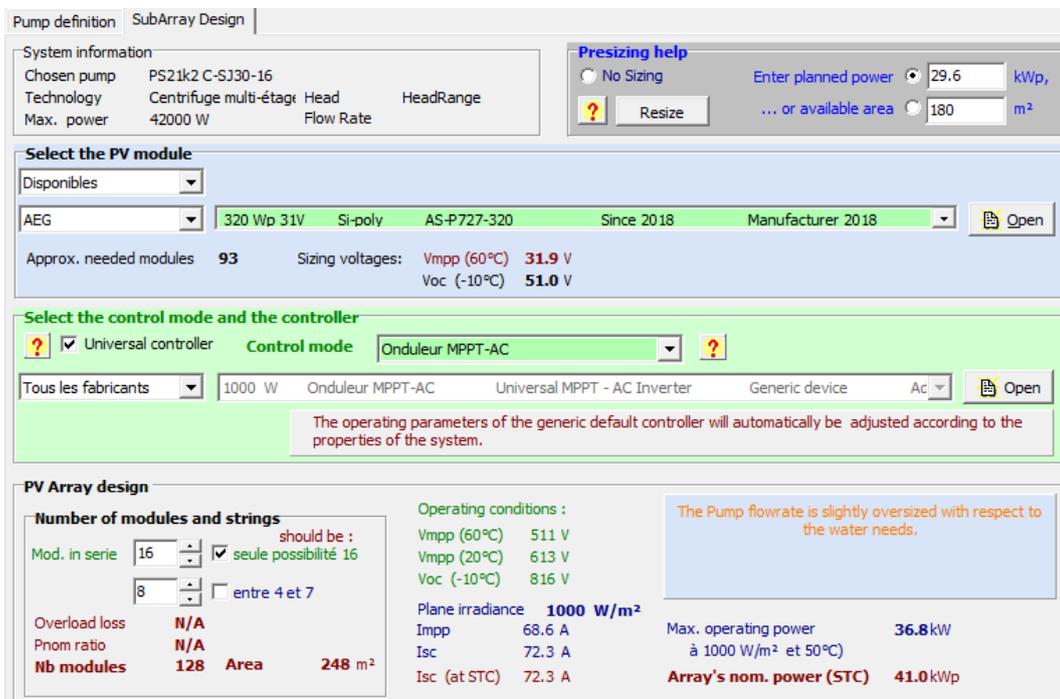


Fig.III.30 : Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

III.3.1.1.1 Interprétations des résultats du dimensionnement de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1

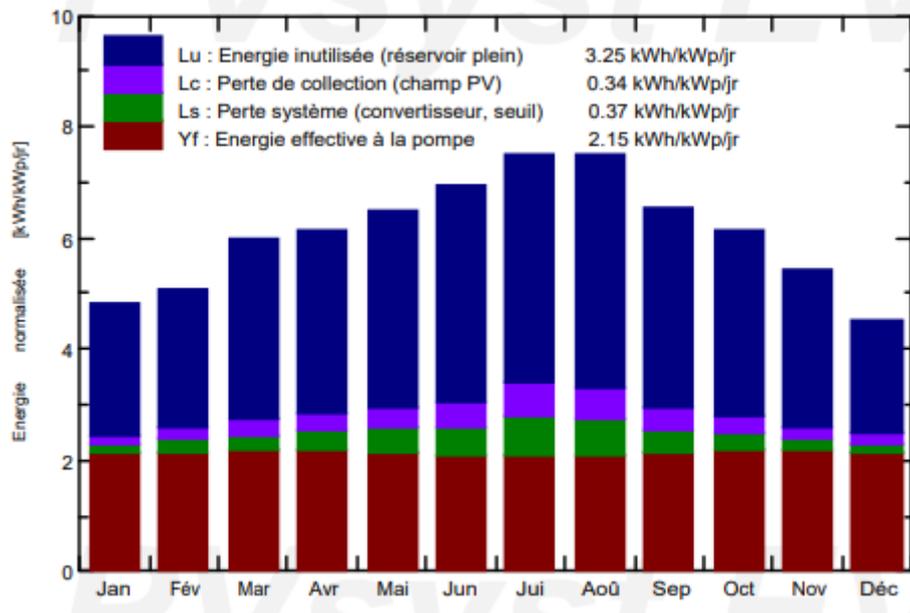


Fig.III.31 : Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

D'après le diagramme des productions normalisées de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1 (figure III.31), nous remarquons une stabilité de l'énergie effective à la pompe avec une valeur de 2.15 KWh/KWp/jr.

Le diagramme représente des fortes valeurs d'énergie inutilisée, vu que le système du pompage est surdimensionné par rapport aux besoins en eau, et par la suite une installation solaire surdimensionnée de grande puissance.

Nous constatons également que l'énergie inutilisée (3.25 KWh/KWp/jr) est proportionnelle aux pertes liées au système (0.37 KWh/KWp/jr) et au champ PV (0.34 KWh/KWp/jr). Elles ont tendance à augmenter durant la période estivale en raison de l'augmentation de l'irradiance solaire par rapport à la période hivernale.

Tab.III.4 : Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

	GlobEff kWh/m ²	EArrMPP kWh	E_PmpOp kWh	ETkFull kWh	H_Pump mCE	WPumped m ³	W_Used m ³	W_Miss m ³
Janvier	146.4	5607	2705	2554	88.53	6621	6568	174.1
Février	140.2	5322	2450	2435	88.53	5987	5978	111.6
Mars	181.7	6750	2772	3279	88.53	6743	6743	0.0
Avril	180.1	6641	2704	3125	88.53	6468	6468	57.3
Mai	195.2	7097	2733	3304	88.53	6737	6743	0.0
Juin	202.3	7164	2576	3201	88.53	6518	6525	0.0
Juillet	226.4	7807	2645	3007	88.53	6755	6743	0.0
Août	227.6	7836	2643	3051	88.53	6743	6743	0.0
Septembre	192.1	6797	2631	2874	88.53	6525	6525	0.0
Octobre	186.9	6715	2808	2975	88.53	6733	6743	0.0
Novembre	160.7	5973	2679	2755	88.53	6525	6525	0.0
Décembre	137.4	5224	2732	2169	88.53	6742	6743	0.0
Année	2176.9	78934	32076	34730	88.53	79097	79045	342.9

Légendes:	GlobEff	Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages	H_Pump	Pression totale moyenne à la pompe
	EArrMPP	Energie champ, virtuelle au MPP	WPumped	Eau pompée
	E_PmpOp	Energie de fonctionnement pompe	W_Used	Eau consommée
	ETkFull	Energie inutilisée (réservoir plein)	W_Miss	Eau manquante

Le tableau III.4 des bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire regroupe tous les paramètres énergétiques du système de pompage solaire.

Nous constatons un manque d'eau durant la période hivernale estimé de 57.3 m³ à 174.1 m³, qui se traduit par le volume important de l'eau consommée par rapport à l'eau pompée, en raison de la variation de l'énergie produite par le champ PV durant l'année qui atteint sa valeur maximale de 7836 KWh en mois d'aout et minimale de 5224 KWh en mois de décembre.

Nous remarquons également que l'irradiance est proportionnelle à l'énergie produite par le champ PV avec une valeur maximale de 227.6 KWh/m² en aout et une valeur minimale de 137.4 KWh/m² en décembre.

III.3.1.2 Dimensionnement de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2

La profondeur du bassin 1 (250 m³) et le bassin 2 (5000 m³) est respectivement 2 m et 8 m avec une distance de 620 m et une pente de 7 m.

Le logiciel ne dimensionne pas des installations du pompage solaire d'un bassin vers un autre bassin, donc nous avons supposé que le bassin 2 est une rivière.

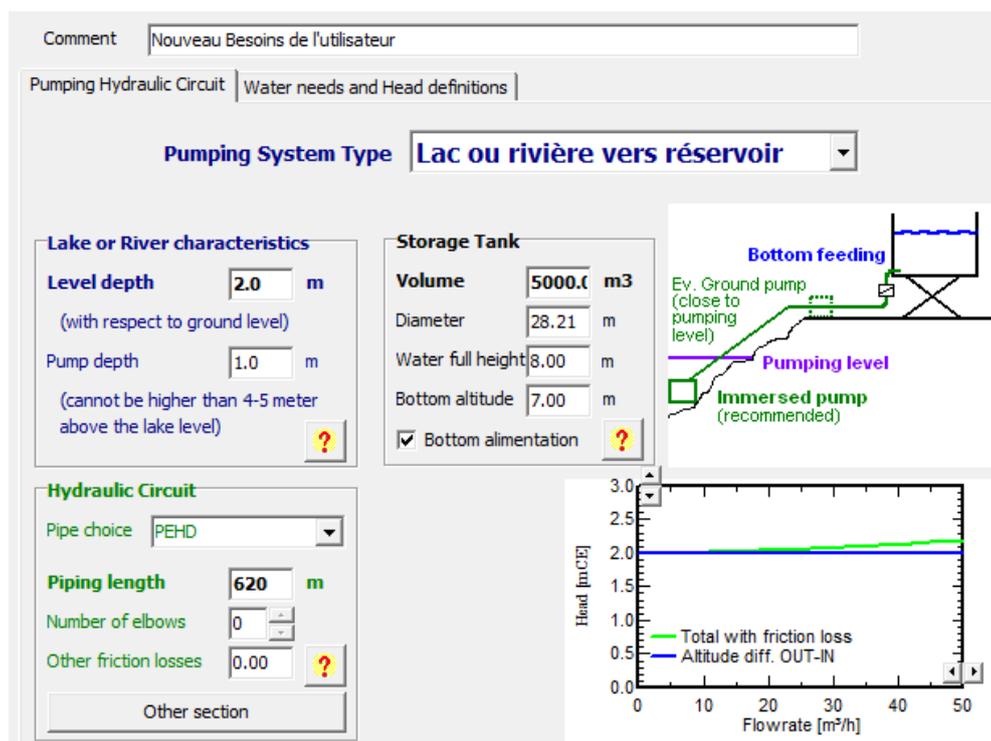


Fig.III.32 : Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

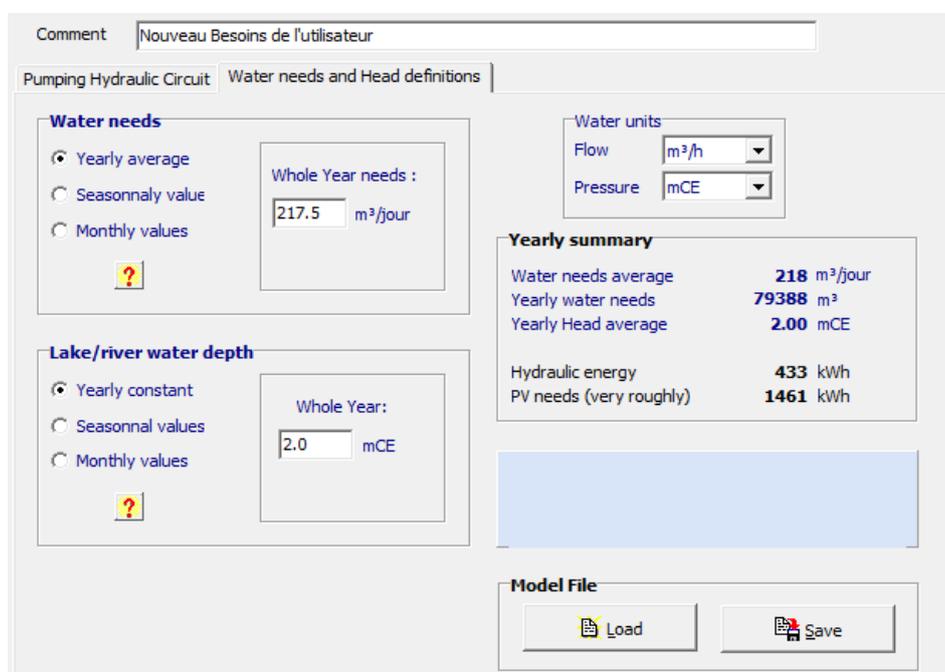


Fig.III.33 : Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

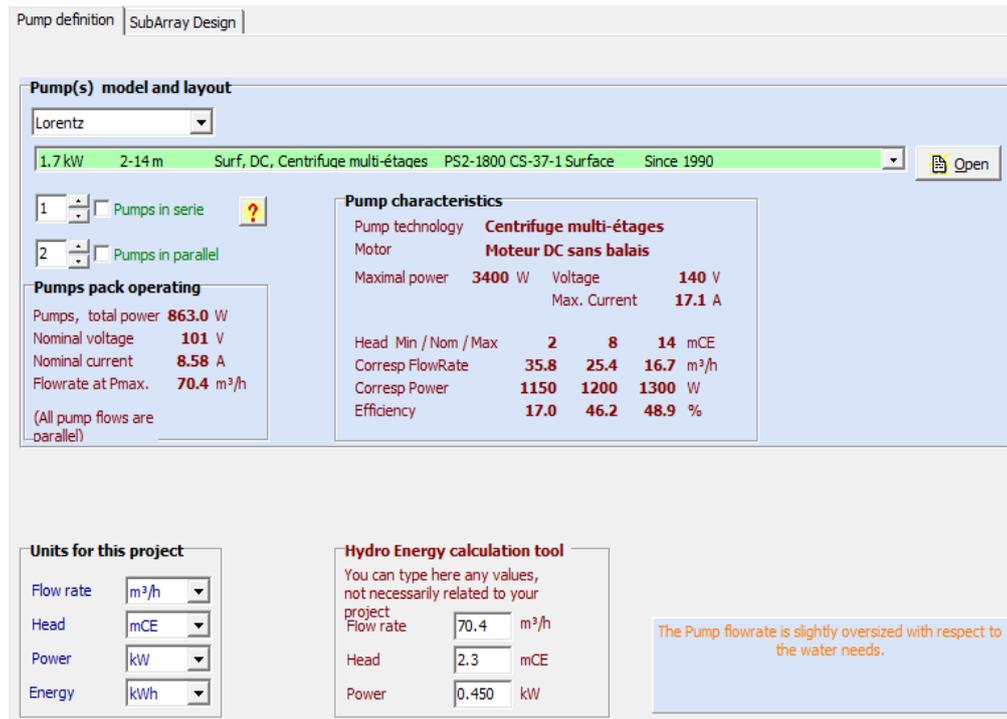


Fig.III.34 : Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

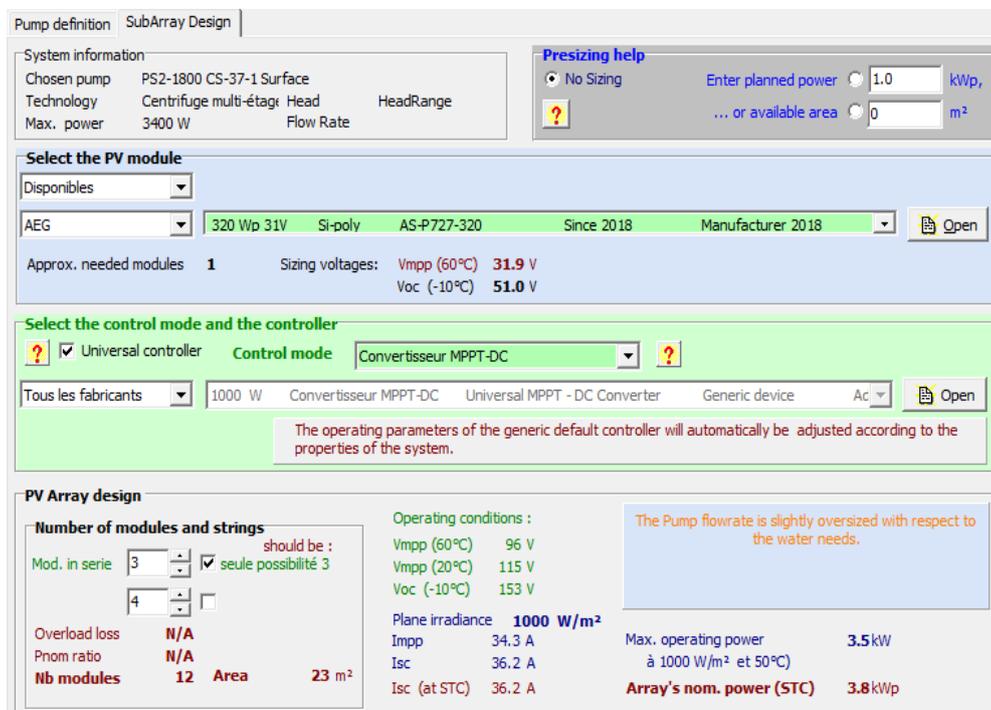


Fig.III.35 : Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

III.3.1.2.1 Interprétations des résultats du dimensionnement de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2

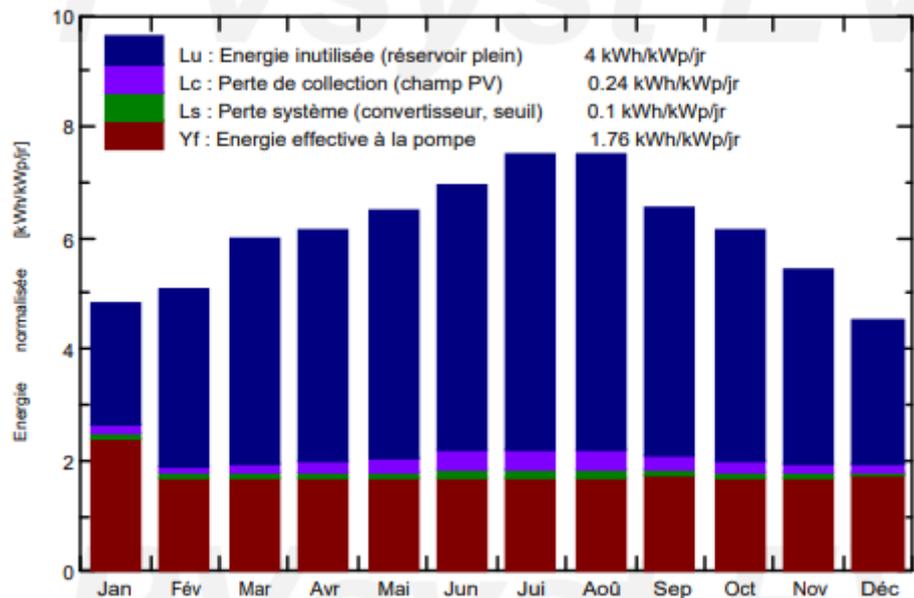


Fig.III.36 : Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

Le diagramme des productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2 (figure III.36), représente des fortes valeurs d'énergie inutilisée, en raison que les besoins en eau sont très faibles ($217.5 \text{ m}^3/\text{jour}$) par rapport au système de pompage solaire dimensionné, qui a pour but de pomper l'eau vers le bassin 2 et le remplir pour atteindre un volume de 5000 m^3 .

Nous remarquons également que l'énergie inutilisée (4 kWh/KWp/jr) est proportionnelle aux pertes liées au système (0.1 kWh/KWp/jr) et au champ PV (0.24 kWh/KWp/jr). Elles ont tendance à augmenter durant la période estivale en raison de l'augmentation de l'irradiance solaire par rapport à la période hivernale.

Le logiciel considère que le fonctionnement du système de pompage débute à partir du mois de janvier afin de remplir le bassin 2 jusqu'à un volume de 5000 m^3 (sachant que le bassin 2 est complètement vide avant le pompage), pour cette raison l'énergie effective à la pompe pour le mois de janvier est supérieure par rapport au reste des mois de l'année avec une valeur de 2.4 kWh/KWp/jr ; l'énergie effective à la pompe est constante pour les mois de février au décembre étant donné que le bassin 2 contient une certaine quantité de l'eau pompée pendant le mois de janvier.

Tab.III.5 : Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

	GlobEff kWh/m ²	EArrMPP kWh	E_PmpOp kWh	ETkFull kWh	H_Pump mCE	WPumped m ³	W_Used m ³	W_Miss m ³
Janvier	146.4	525.6	285.5	223.8	2.244	9179	6743	0.000
Février	140.2	498.9	182.9	299.2	2.200	6090	6090	0.000
Mars	181.7	632.8	202.0	406.0	2.189	6751	6743	0.000
Avril	180.1	622.6	196.4	399.9	2.155	6525	6525	0.000
Mai	195.2	665.4	198.8	433.2	2.161	6740	6743	0.000
Juin	202.3	671.6	195.6	431.6	2.175	6518	6525	0.000
Juillet	226.4	731.9	201.1	461.3	2.181	6752	6743	0.000
Août	227.6	734.6	203.6	462.1	2.181	6743	6743	0.000
Septembre	192.1	637.3	197.9	396.6	2.174	6516	6525	0.000
Octobre	186.9	629.5	203.0	394.3	2.225	6743	6743	0.000
Novembre	160.7	559.9	197.2	342.1	2.216	6516	6525	0.000
Décembre	137.4	489.8	205.0	267.3	2.240	6743	6743	0.000
Année	2176.9	7400.0	2469.2	4517.3	2.193	81816	79388	0.000

Légendes: GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages H_Pump Pression totale moyenne à la pompe
 EArrMPP Energie champ, virtuelle au MPP WPumped Eau pompée
 E_PmpOp Energie de fonctionnement pompe W_Used Eau consommée
 ETkFull Energie inutilisée (réservoir plein) W_Miss Eau manquante

D'après le tableau III.5, nous remarquons des valeurs d'énergie inutilisée trop élevées, en raison du surdimensionnement du système de pompage solaire par rapport aux besoins en eau. De ce fait nous constatons une suffisance en eau durant tous les mois de l'année.

III.3.1.3 Dimensionnement de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2A

Dans cette phase d'étude, le logiciel PVsyst ne répond pas au dimensionnement des projets de pompage solaire destinés à favoriser la circulation de l'eau dans les réseaux d'irrigation, Ainsi l'utilisation des lois correspondantes est propice à tel dimensionnement.

Le dimensionnement de la pompe dans cette partie dépend au débit et la hauteur manométrique. Le débit est estimé à 217.5 m³/jour pour irriguer 5 Ha pendant 10 heures (soit 21.75 m³/h ou 6.04*10⁻³ m³/s).

$$HMT = H_g + \Delta h \quad [105]$$

Avec :

HMT : hauteur manométrique (en mètre)

H_g : la hauteur piézométrique représente la différence de niveau entre les basses eaux et le point le point élevé de la distribution (en mètre)

Δh : les pertes de charge régulière (en mètre) [105]

▪ Calcul de la hauteur piézométrique

Dans notre cas la hauteur piézométrique est la différence d'altitude entre le point de distribution le plus défavorable (c'est-à-dire le gouteur le plus loin et le plus haut) et les basses eaux dans le bassin 2, sachant que le bassin 2 est un bassin géomembrane.

L'altitude du gouteur le plus défavorable : 172 m.

L'altitude du bassin 2 : 158 m.

La profondeur du bassin 2 : 8 m.

$$H_g = 172 - 158 - 8$$

$$H_g = 6 \text{ m.}$$

▪ Calcul des pertes de charges régulières

$$\Delta h = \frac{\lambda * L * V^2}{2 * g * D} \quad [106]$$

λ : coefficient de perte de charge

V : la vitesse moyenne d'écoulement à l'intérieur du canal (m/s).

L : la longueur du canal (m).

D : le diamètre intérieur du canal (m).

g : la pesanteur (9.81 m/s²). [105]

Dans notre cas la longueur du canal est de 1660 m, son diamètre intérieur est de 0.08 m.

- Calcul de la vitesse moyenne d'écoulement à l'intérieur du canal

$$Q = S * V \quad [106]$$

Q : le débit à l'intérieur du canal (m³/s)

S : section intérieure du canal (m²) $S = \frac{\pi * D^2}{4}$

L'équation de la vitesse sera donc :

$$V = \frac{Q * 4}{\pi * D^2} \quad [106]$$

$$V = \frac{6.04 * 10^{-3} * 4}{\pi * 0.08^2}$$

$$\rightarrow V = 1.2 \text{ m/s}$$

- Calcul du coefficient de perte de charge

Le choix de la corrélation du coefficient de perte de charge se fait selon le type de l'écoulement (turbulent ou laminaire) à l'aide de l'équation de Reynolds [107]

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad [107]$$

Avec ν : La viscosité cinématique ($\nu=10^{-6}$ m²/s pour l'eau)

$$Re = \frac{1.2 * 0.08}{10^{-6}}$$

$$\rightarrow Re = 96000$$

L'écoulement est turbulent car $Re > 4000$, on utilise donc l'équation empirique de Colebrook ;

$$\lambda = \left(-2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{\lambda}} \right) \right)^{-2} \quad [108]$$

Avec ε : la rugosité interne de la conduite. La conduite utilisée dans notre cas est PEHD sa rugosité est de $3 * 10^{-6}$ m. [104]

Par itération $\lambda = 0.018$.

$$\Delta h = \frac{\lambda * L * V^2}{2 * g * D} = \frac{0.018 * 1660 * 1.2^2}{2 * 9.81 * 0.08}$$

$$\rightarrow \Delta h = 27.421 \text{ m}$$

Nous pouvons maintenant calculer la hauteur manométrique

$$HMT = H_g + \Delta h = 6 + 27.421$$

$$\rightarrow HMT = 33.412 \text{ m}$$

Selon le catalogue des pompes, la pompe adéquate a les caractéristiques suivantes :

Tab.III.6 : Les caractéristiques de la pompe à eau du bassin 2 vers la parcelle 2. [109]

Tension d'alimentation en volt	Puissance en kW	Débit en l/min	Débit en m ³ /h	Hauteur manométrique en mètres
220 V	0,65 kW	De 0 à 100 l/min	De 0 à 6 m ³ /h	De 46 à 11 HMT

Pour assurer le débit de 21.75 m³/h nous devons installer 4 pompes de 6 m³/h en parallèle.

Pour calculer le nombre de panneaux nécessaire, nous divisons la puissance totale du système de pompage par la puissance d'un seul panneau, sachant que le panneau utilisé dans notre

dimensionnement est de 320 W, et la puissance du démarrage de la pompe est 3 fois la puissance absorbée par la pompe. [110]

$$\text{Nombre de panneaux} = \frac{4 \cdot 650 \cdot 3}{320}$$

Nombre de panneaux = 25 panneaux photovoltaïques.

Quant au choix de l'onduleur, le convertisseur Pur Sinus offre une tension parfaitement stable, de même qualité que celui du réseau électrique. Il permet d'alimenter tous les appareils en 220/230V, y compris les appareils inductifs, sensibles et à fort courant au démarrage. [111]

III.3.2 Dimensionnement des installations du pompage solaire du deuxième scénario

Le deuxième scénario vise à valoriser l'irrigation par gravitation, afin de réduire le nombre de pompes. Pour ce faire, nous supposons d'élaborer un bassin au niveau de la parcelle la plus élevée (parcelle 2A) suivant la figure III.37.

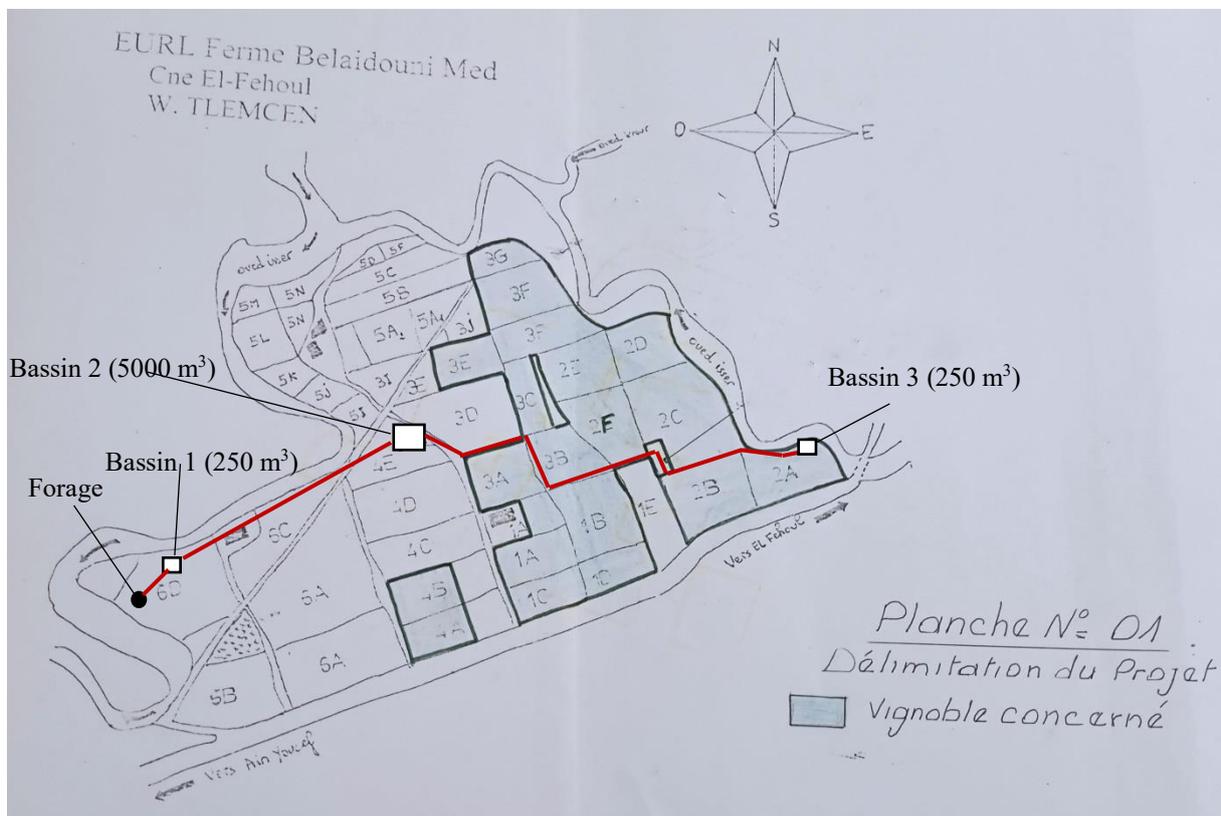


Fig.III.37 : Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du deuxième scénario. [104]

Les installations du système de pompage solaire du forage vers le bassin 1 et du bassin 1 vers le bassin 2 sont déjà dimensionnées dans le premier scénario (titre III.1).

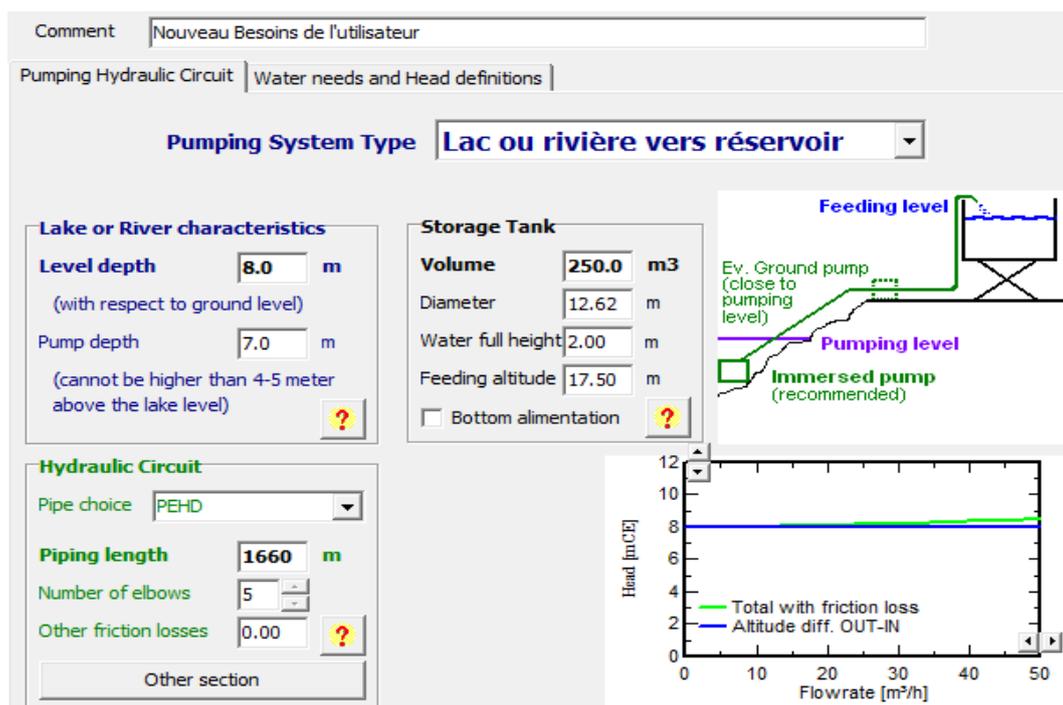


Fig.III.38 : Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

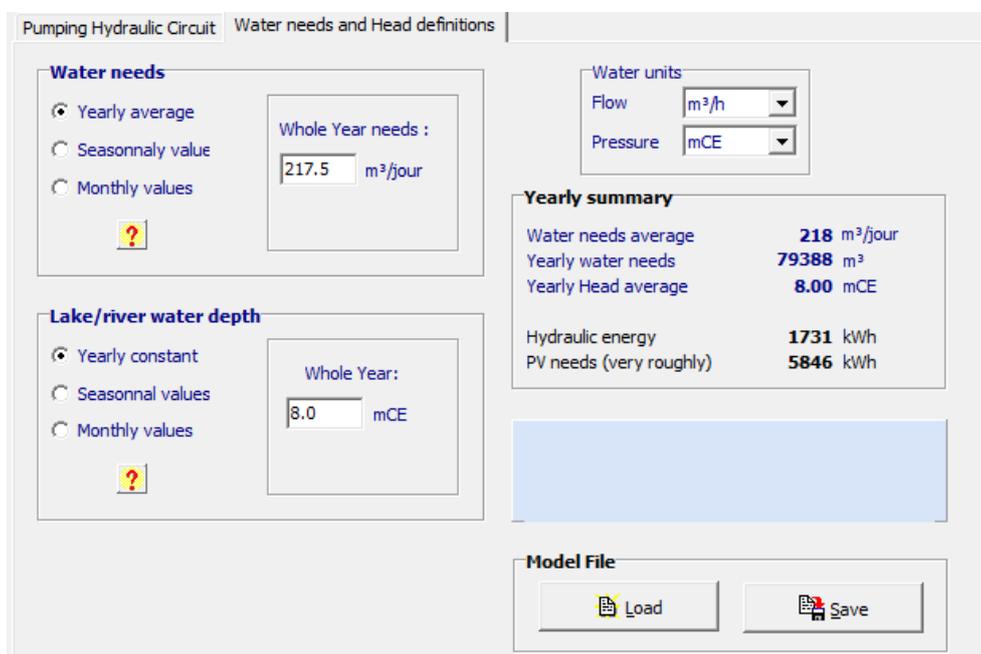


Fig.III.39 : Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

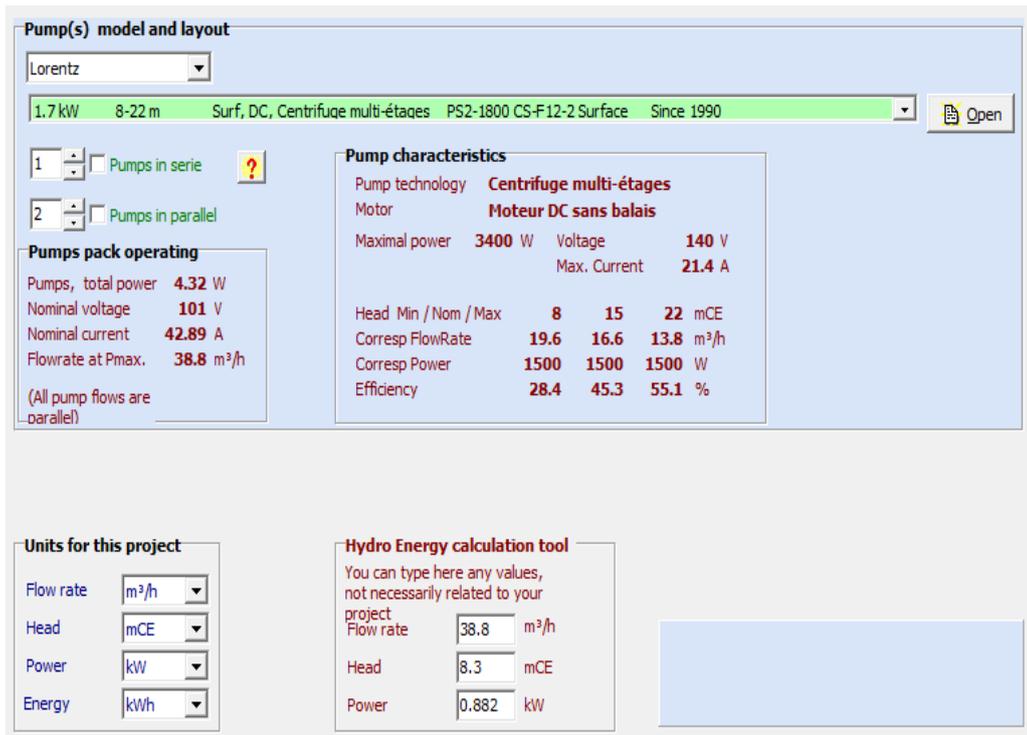


Fig.III.40 : Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

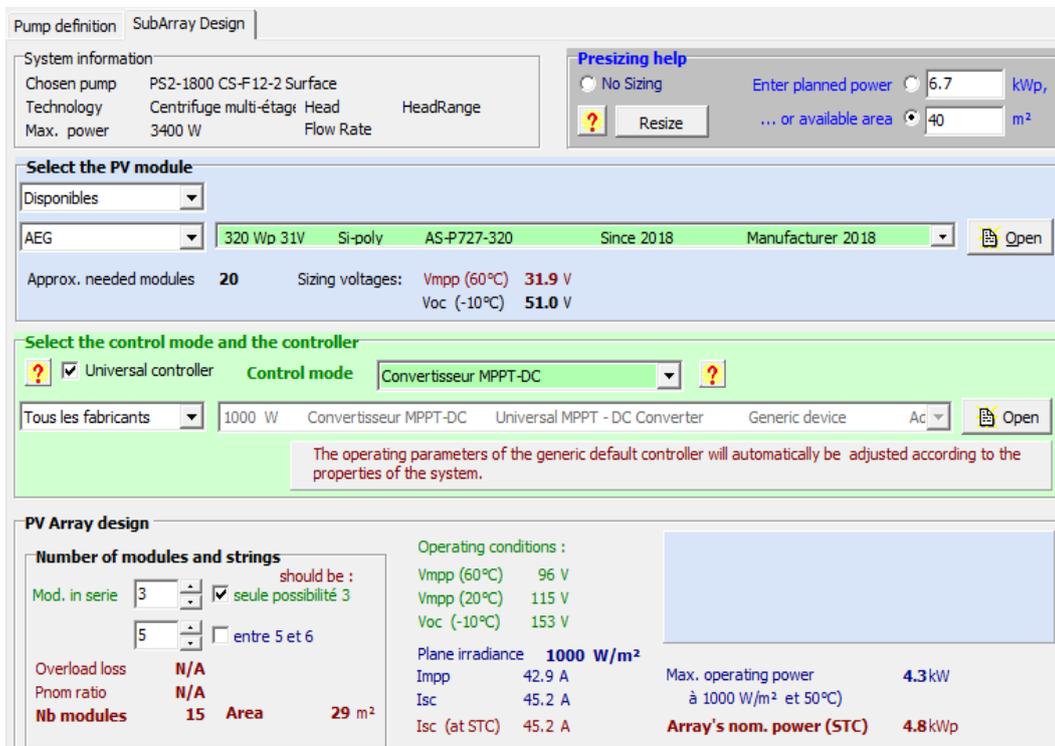


Fig.III.41 : Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

III.3.2.1.1 Interprétations des résultats du dimensionnement de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3

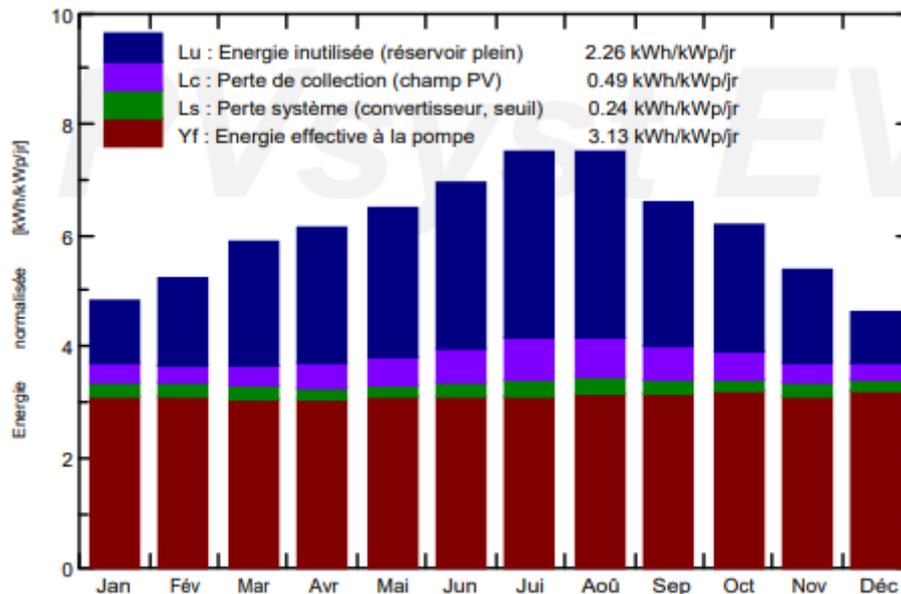


Fig.III.42 : Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

D'après le diagramme des productions normalisées de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3 (figure III.42), nous remarquons une stabilité de l'énergie effective à la pompe avec une valeur de 3.13 KWh/KWp/jr.

Le graphique représente des valeurs élevées pour l'énergie inutilisée, vu que le système du pompage est surdimensionné par rapport aux besoins en eau, et par la suite une installation solaire surdimensionnée de grande puissance.

Nous constatons également que l'énergie inutilisée (3.13 KWh/KWp/jr) est proportionnelle aux pertes liées au système (0.24 KWh/KWp/jr) et au champ PV (0.49 KWh/KWp/jr). Elles ont tendance à augmenter durant la période estivale en raison de l'augmentation de l'irradiance solaire par rapport à la période hivernale.

Tab.III.7 : Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

	GlobEff kWh/m ²	EArrMPP kWh	E_PmpOp kWh	ETkFull kWh	H_Pump mCE	WPumped m ³	W_Used m ³	W_Miss m ³
Janvier	147.6	656.2	464.0	142.9	8.366	6600	6643	88.8
Février	144.1	637.1	417.3	174.3	8.377	5959	5855	225.3
Mars	178.6	776.4	456.9	260.1	8.332	6740	6732	0.0
Avril	178.9	771.5	438.5	269.8	8.290	6503	6504	10.2
Mai	195.1	826.9	460.0	306.0	8.303	6732	6732	0.0
Juin	202.9	843.9	448.1	338.2	8.323	6516	6515	0.0
Juillet	225.6	911.4	464.2	357.6	8.329	6732	6732	0.0
Août	227.4	916.1	471.0	354.3	8.327	6729	6732	0.0
Septembre	192.8	797.6	455.2	280.6	8.323	6508	6515	0.0
Octobre	188.0	790.6	473.5	260.7	8.397	6703	6703	29.0
Novembre	159.2	696.9	450.6	199.1	8.379	6505	6515	0.0
Décembre	141.8	631.5	477.1	117.4	8.411	6718	6718	13.3
Année	2182.0	9256.2	5476.5	3060.8	8.343	78946	78893	366.6

Légendes: GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages H_Pump Pression totale moyenne à la pompe
 EArrMPP Energie champ, virtuelle au MPP WPumped Eau pompée
 E_PmpOp Energie de fonctionnement pompe W_Used Eau consommée
 ETkFull Energie inutilisée (réservoir plein) W_Miss Eau manquante

D'après le tableau III.7, nous notons des hautes valeurs d'énergie inutilisée, en raison de l'agrandissement du système de pompage solaire par rapport aux besoins en eau. Et de là, nous remarquons une quantité suffisante d'eau pendant certains mois de l'année. Quant au reste des mois de l'année, les besoins en eau pour l'irrigation durant la période hivernale sont très faibles, ce qui signifie que l'eau sera disponible au mois d'avril.

III.3.3 Dimensionnement des installations du pompage solaire du troisième scénario

L'objectif du troisième scénario est la mise en évidence de l'influence du nombre de bassins sur le système de pompage. Ce scénario consiste de pomper l'eau du forage vers le bassin 3 sans l'intermédiaire du bassin 1 et le bassin 2 (figure III.43).

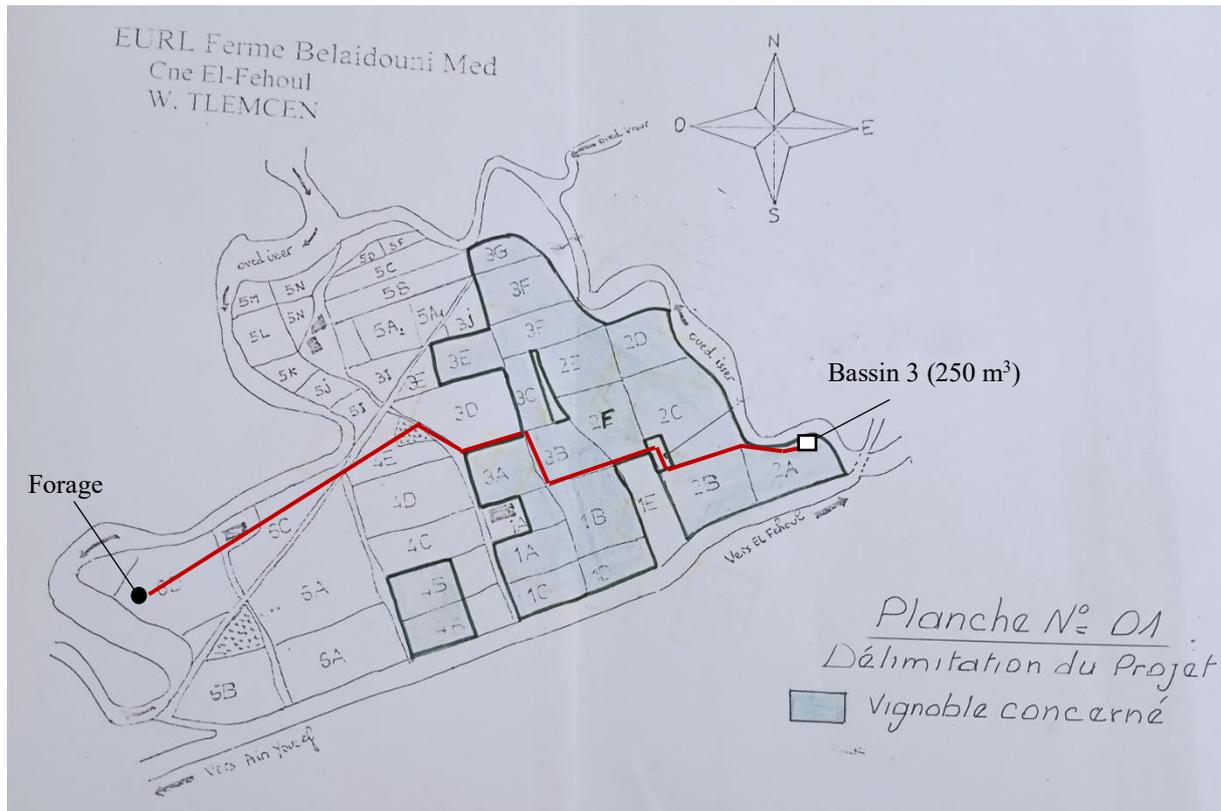


Fig.III.43 : Plan du dimensionnement des installations du pompage solaire du troisième scénario. [104]

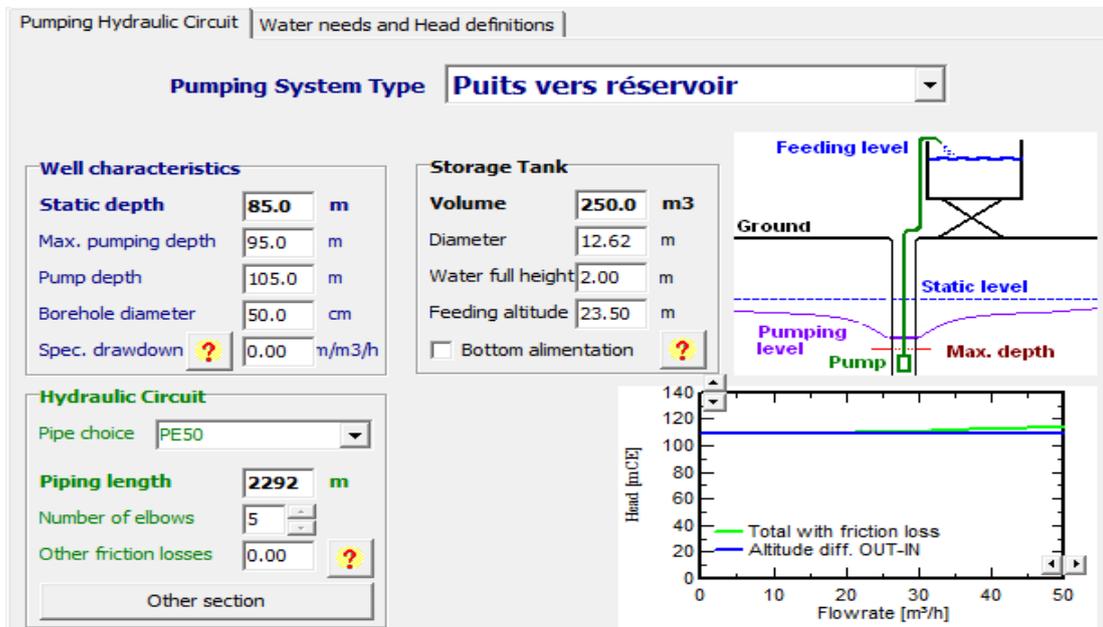


Fig.III.44 : Identification du circuit hydraulique du pompage de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

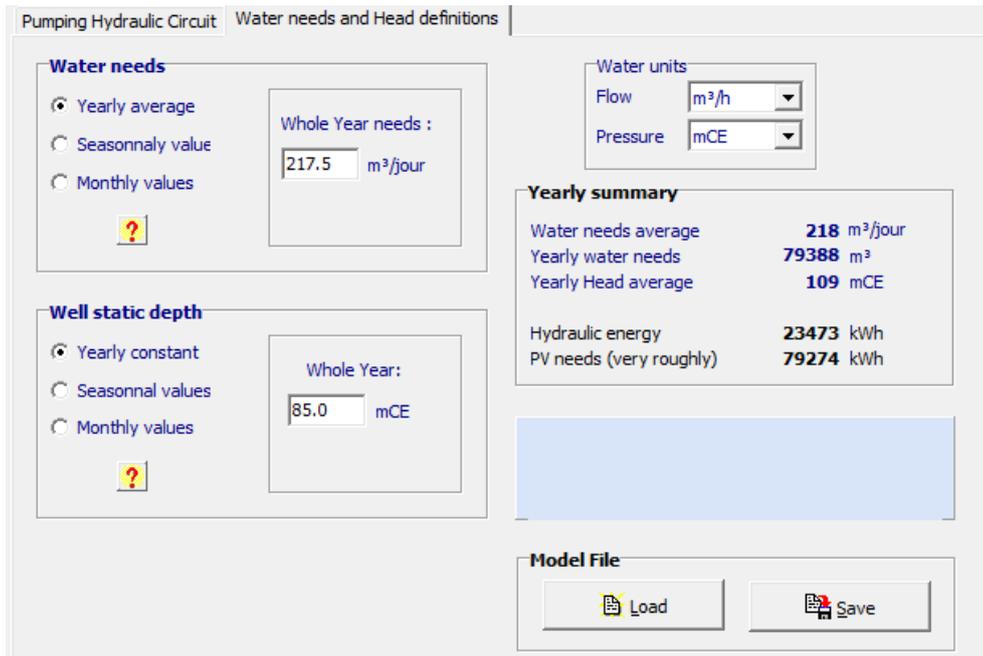


Fig.III.45 : Identification des besoins en eau et pression de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.



Fig.III.46 : Identification des caractéristiques de la pompe de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

Pump definition SubArray Design

System information
 Chosen pump PSk2-15 C-5317-18
 Technology Centrifuge multi-étage: Head HeadRange
 Max. power 30000 W Flow Rate

Presizing help
 No Sizing Enter planned power kWp,
 ... or available area m²

Select the PV module
 Disponibles
 AEG 320 Wp 31V Si-poly AS-P727-320 Since 2018 Manufacturer 2018
 Approx. needed modules 107 Sizing voltages: Vmpp (60°C) 31.9 V
 Voc (-10°C) 51.0 V

Select the control mode and the controller
 Universal controller Control mode Onduleur MPPT-AC
 Tous les fabricants 1000 W Onduleur MPPT-AC Universal MPPT - AC Inverter Generic device Ac
 The operating parameters of the generic default controller will automatically be adjusted according to the properties of the system.

PV Array design
 Number of modules and strings
 Mod. in serie 16 should be : seule possibilité 16
 9 entre 5 et 9
 Overload loss N/A
 Pnom ratio N/A
 Nb modules 144 Area 279 m²

Operating conditions :
 Vmpp (60°C) 511 V
 Vmpp (20°C) 613 V
 Voc (-10°C) 816 V
 Plane irradiance 1000 W/m²
 Imp 77.2 A
 Isc 81.4 A
 Isc (at STC) 81.4 A

Max. operating power 41.4 kW
 à 1000 W/m² et 50°C
Array's nom. power (STC) 46.1 kWp

Fig.III.47 : Conception du sous-champ de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

III.3.3.1 Interprétations des résultats du dimensionnement de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3

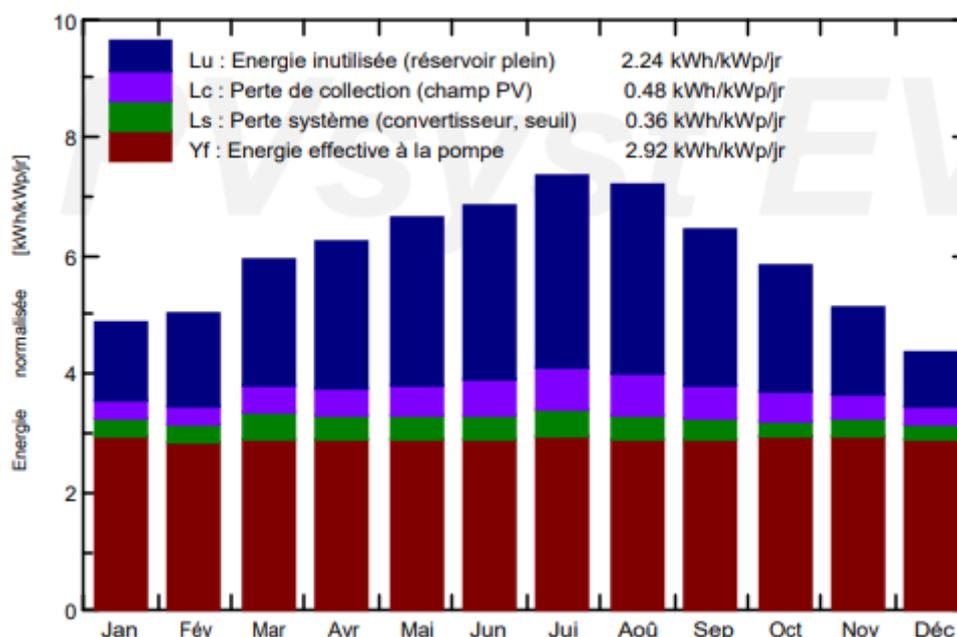


Fig.III.48 : Productions normalisées de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

Selon, la Fig. III.48 qui montre le schéma de production normal de l'installation de pompage solaire forage vers le bassin 3, on peut voir que la puissance effective de la pompe est constante à 2,92 KWh / KWc / jour.

Il existe également des valeurs élevées d'énergie inutilisée, ce qui indique que le système solaire fournit plus d'eau par à rapport à ce nous avons besoin.

Nous notons également que l'énergie inutilisée (2.24 KWh/KWp/jr) est proportionnelle aux pertes liées au système (0.36 KWh/KWp/jr) et au champ PV (0.48 KWh/KWp/jr). Elles ont tendance à augmenter durant la période estivale en raison de l'augmentation de l'irradiance solaire par rapport à la période hivernale.

Tab.III.8 : Bilans et principaux résultats de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

	GlobEff kWh/m ²	EArrMPP kWh	E_PmpOp kWh	ETkFull kWh	H_Pump mCE	WPumped m ³	W_Used m ³	W_Miss m ³
Janvier	148.6	6301	4202	1524	111.4	6720	6650	92.8
Février	138.4	5883	3693	1683	111.5	5987	5987	103.4
Mars	180.0	7425	4172	2228	111.2	6743	6743	0.0
Avril	182.8	7547	3992	2600	111.3	6525	6525	0.0
Mai	200.1	8158	4128	3133	111.6	6743	6743	0.0
Juin	199.8	8013	4002	3160	111.7	6525	6525	0.0
Juillet	221.9	8642	4188	3465	111.7	6743	6743	0.0
Août	217.9	8480	4181	3383	111.7	6743	6743	0.0
Septembre	188.5	7507	4034	2702	111.4	6525	6525	0.0
Octobre	177.1	7155	4204	2300	111.1	6737	6743	0.0
Novembre	151.7	6308	4080	1615	111.3	6479	6525	0.0
Décembre	133.3	5680	4174	1111	111.4	6785	6743	0.0
Année	2140.3	87099	49050	28905	111.4	79253	79191	196.3

Légendes: **GlobEff** Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages **H_Pump** Pression totale moyenne à la pompe
EArrMPP Energie champ, virtuelle au MPP **WPumped** Eau pompée
E_PmpOp Energie de fonctionnement pompe **W_Used** Eau consommée
ETkFull Energie inutilisée (réservoir plein) **W_Miss** Eau manquante

D'après le tableau III.8, nous pouvons voir que les valeurs d'énergie inutilisée sont élevées en raison du fait que le système de pompage solaire fournit plus que nous avons besoin en eau. En conséquence, de mars à décembre, il n'y a pas de besoin en eau, mais quant aux mois de janvier et février, les quantités d'eau perdues s'élèvent respectivement à 92,8 m³ et 103,4 m³. Ils ne représentent pas un problème de pénurie d'eau, car les besoins en eau pendant la période hivernale sont très faibles.

III.4 Évaluation économique de l'installation du pompage photovoltaïque au niveau de la ferme BELAIDOUNI

L'évaluation économique de chaque scénario permet d'opter le meilleur d'entre d'eux, dont le cout d'investissement est réduit. Nous le comparons ensuite avec l'ancien système de pompage (gasoil) en calculant le gain et le nombre d'années pour amortir.

Pour tout ce qui suit :

- Le cout des supports des modules est estimé à 100 DZD/Wc [112] ;
- Le cout de maintenance est estimé à 960 DZD/KWc/an.[112]

III.4.1 La durée de vie

La durée de vie des équipements de l'installation photovoltaïque n'est pas permanente, car elle dépend de plusieurs facteurs dont la maintenance et la durée de fonctionnement. Dans notre étude, le choix de la durée de vie économique est lié à la durée de vie estimée des modules photovoltaïques qui est généralement de 25 ans.

III.4.2 L'investissement initial

L'investissement initial permet d'évaluer le prix lors de l'installation du système photovoltaïque. Le coût total I_{Tot} est calculé par l'expression suivante :

$$I_{Tot} = C_{GPS} + C_{OND} + C_{Mp} + C_{Acc}$$

Avec :

C_{PPS} : Le coût des panneaux photovoltaïques.

C_{OND} : Le coût de l'onduleur.

C_p : Le coût des pompes.

C_{ACC} : Le coût des accessoires.

III.4.2.1 L'investissement initial pour le scénario 1

III.4.2.1.1 L'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1

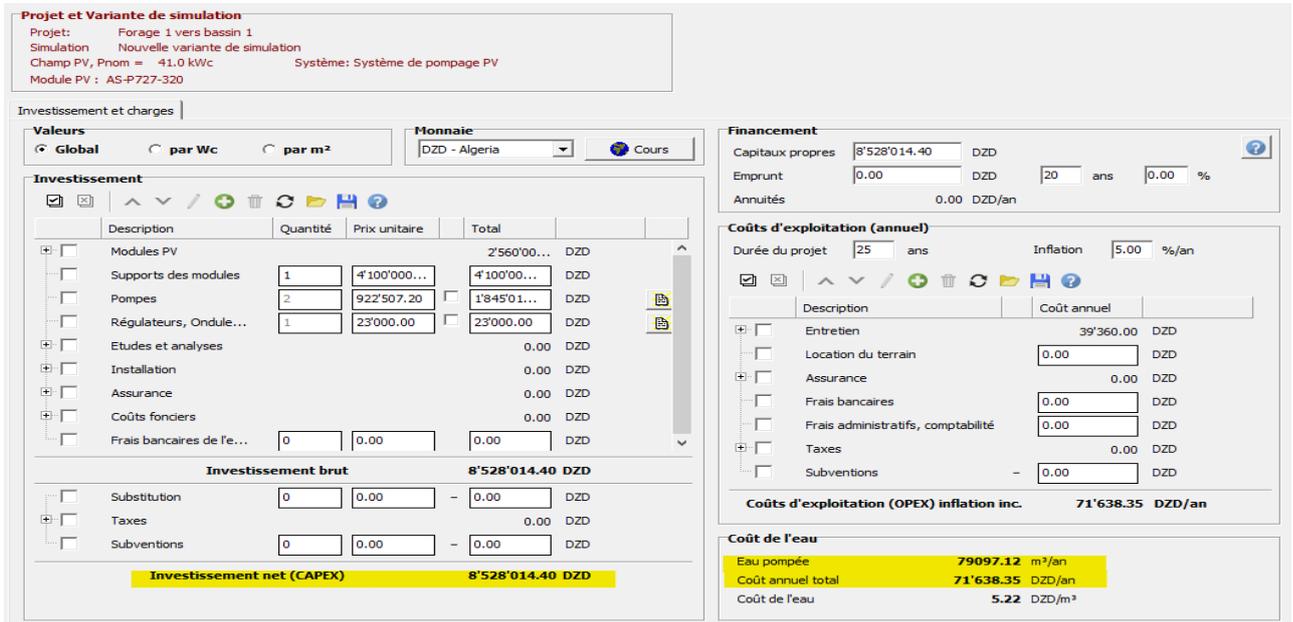


Fig.III.49 : Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1.

Selon la figure III.49, le prix de l'installation de système de pompage entre le forage et le bassin 1 est de 8528014.4 DZD, ainsi que le prix de l'eau pompée par an est de 71638.35 DZD.

III.4.2.1.2 L'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2

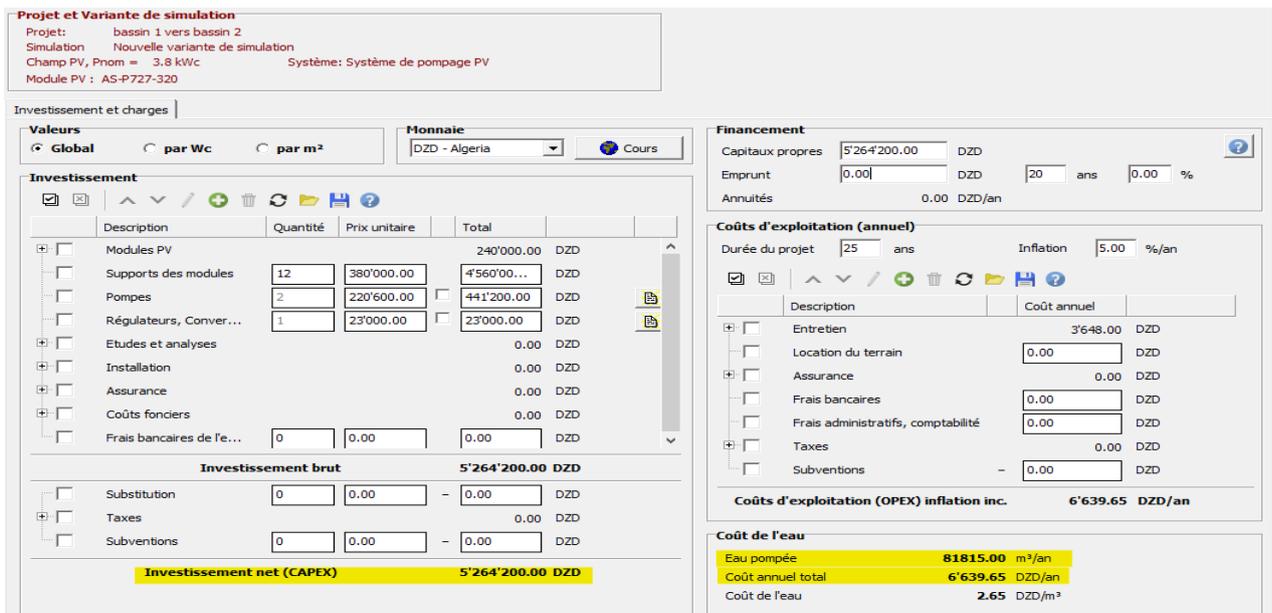


Fig.III.50 : Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2.

Le prix de l'installation de système de pompage entre le bassin 1 et le bassin 2 est 5264200 DZD, ainsi que le prix de l'eau pompée par an est 6639.65 DZD

III.4.2.1.3L'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2A

Le cout de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2 est calculé dans le tableau III.9.

Tab.III.9 : Devis estimatif de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2A.

Dispositifs	Nombre	Prix unitaire (DZD)	Prix (DZD)
Modules PV	25	20000	500000
Pompe	4	111840	447360
Onduleur	1	23000	23000
Supports	/	200000	200000
Maintenance	/	192000	192000
Total	/	546840	1362360

Le cout de maintenance est calculé pour 25 ans

De ce qui précède (Tab.III.9), nous avons un prix de l'installation du pompage solaire pour l'irrigation est 1362360 DZD.

Et à partir de là, le prix total Le premier scénario est :

$$\begin{aligned} \text{Prix total} &= \text{prix de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1} \\ &+ \text{prix de l'installation pompage solaire de bassin 1 vers bassin 2} \\ &+ \text{prix de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers la parcelle 2A} \end{aligned}$$

Donc :

$$\text{Prix total} = 8528014.4 + 5264200 + 1362360 = 15154574.4 \text{ DZD}$$

$$\text{Prix total} = 15154574.4 \text{ DZD}$$

III.4.2.2 L'investissement initial pour le scénario 2

Les pompes utilisées du forage au premier bassin et du bassin 1 au second bassin, ce sont les mêmes que les pompes du premier scénario, car les quantités d'eau utilisées pour l'irrigation ne changent pas, donc les pompes restent les mêmes.

III.4.2.2.1 L'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1

Prix de l'installation du pompage solaire est : 8528014.4 DZD

III.4.2.2.2 L'installation du pompage solaire du bassin 1 vers le bassin 2

Prix de l'installation du pompage solaire : 5264200 DZD

III.4.2.2.3 L'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3

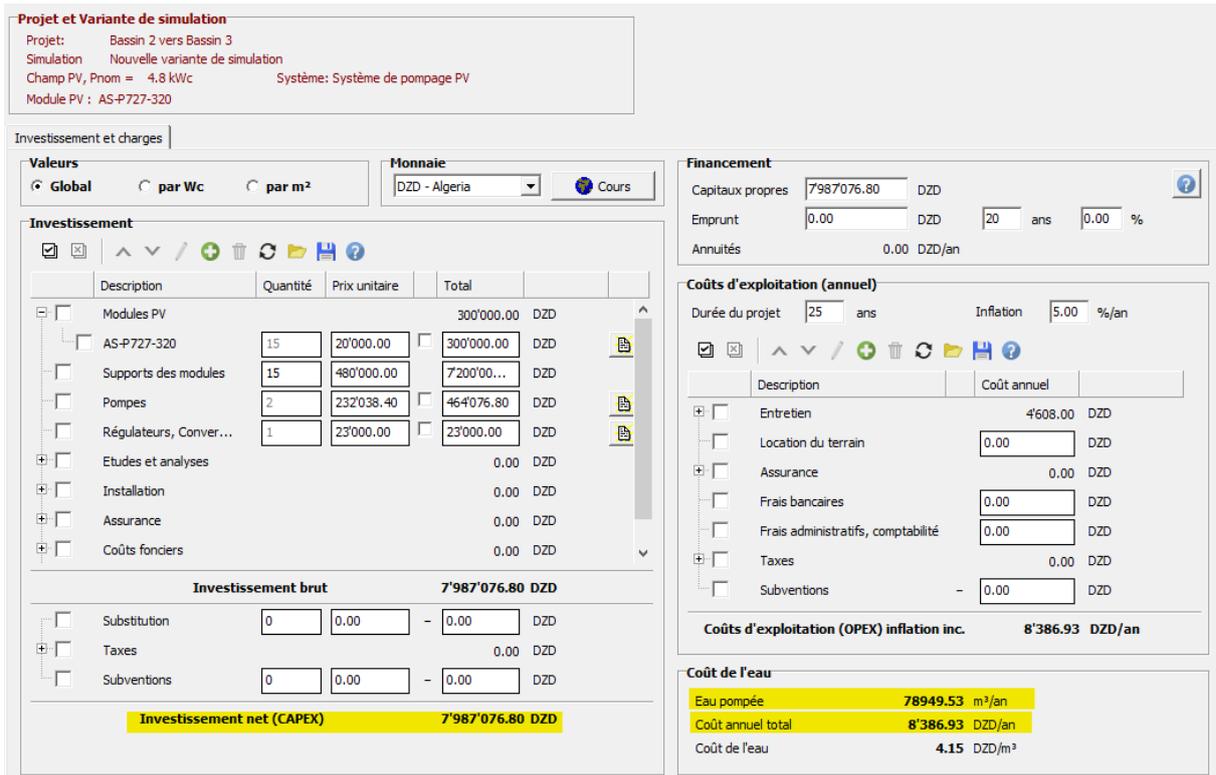


Fig.III.51 : Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du bassin 2 vers le bassin 3.

D'après la figure III.51 le prix de l'installation de système de pompage entre le bassin 2 et le bassin 3 est 7987076.8 DZD, ainsi que le prix de l'eau pompée par an est 8386.93 DZD

Et à partir de là, le prix total du deuxième scénario est :

$$\begin{aligned} \text{Prix total} &= \text{prix de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 1} \\ &+ \text{prix de l'installation du pompage solaire de bassin 1 vers bassin 2} \\ &+ \text{prix de l'installation pompage solaire de bassin 2 vers bassin 3} \end{aligned}$$

Donc :

$$\text{Prix total} = 8528014.4 + 5264200 + 7987076.8 = 21779291.2 \text{ DZD}$$

$$\text{Prix total} = 21779291.2 \text{ DZD}$$

III.4.2.3 L'investissement initial pour le scénario 3

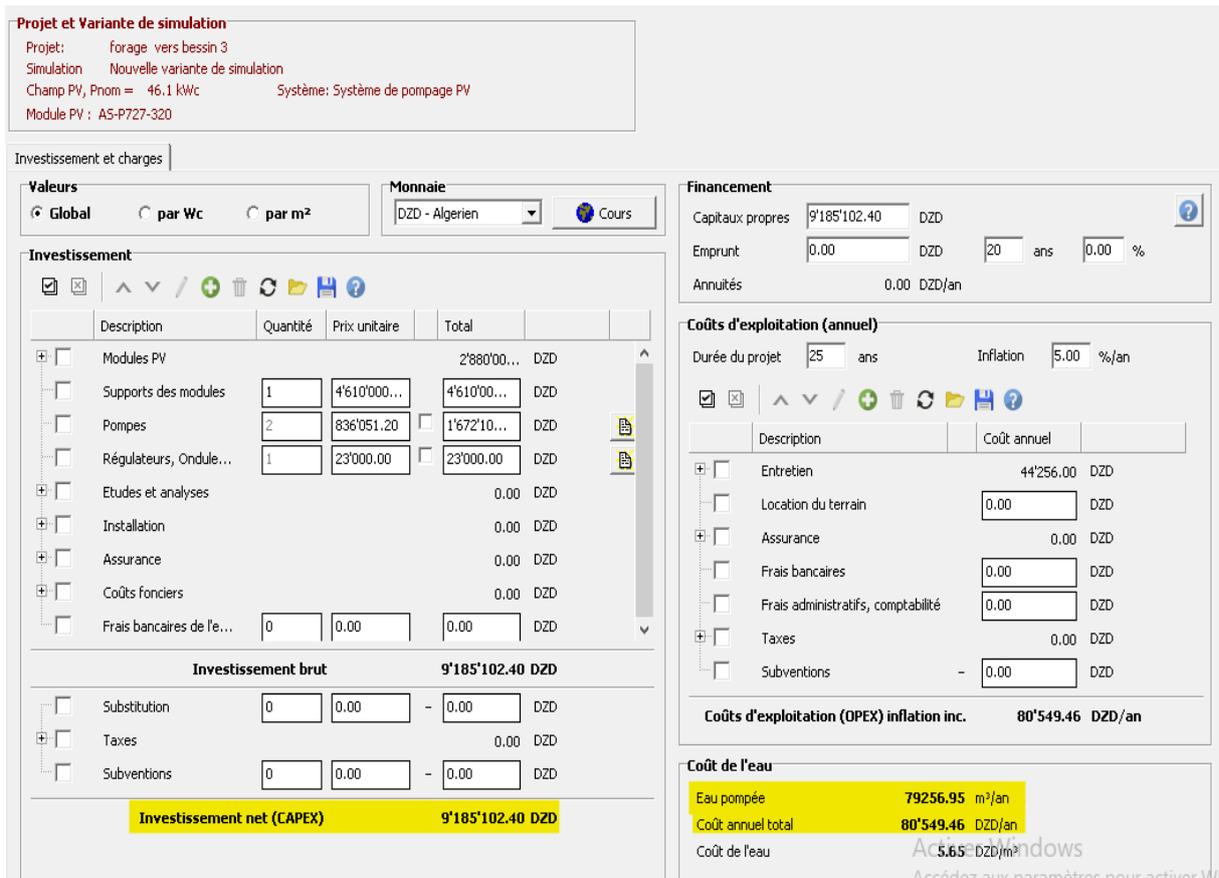


Fig.III.52 : Évaluation économique de l'installation du pompage solaire du forage vers le bassin 3.

Pour le scénario 3, le prix de l'installation est 9185102.40 DZD et le prix de l'eau pompé est 80549.46 DZD.

Tab.III.10. Comparaison des prix des scénarios proposés.

Scénarios	L'investissement initial
Scénario 1	15154574.4
Scénario 2	21779291.2
Scénario 3	9185102.4

D'après le tableau III.10 l'installation du pompage solaire la plus économique est celle du troisième scénario.

III.4.3 Étude économique comparative Photovoltaïque / diesel

Pour choisir un système d'alimentation, plusieurs éléments doivent être comparés. L'énergie proposée doit d'abord démontrer sa compétitivité par rapport aux autres systèmes du même service existant sur le plan économique et technologique.

Nous analyserons les performances et la rentabilité économique de la station de pompage solaire PV, que nous comparerons à l'ancien système alimenté au gasoil existant. Cette analyse conduira à la sélection de l'investissement à prendre en compte car l'analyse des coûts et de la rentabilité est un préalable nécessaire avant de prendre toute décision d'investir dans un système, appareil, énergie, solaire PV ou énergie conventionnelle (diesel ou autre).

La comparaison se fait entre le système du pompage solaire du troisième scénario et l'ancien système de pompage :

Puisque le système du pompage photovoltaïque dure 25 ans, nous calculons le prix du diesel utilisé en 25 ans avec le coût initial du système photovoltaïque.

Tab.III.11. Le cout du carburant consommé par la ferme.

	Le cout moyen annuel	Le cout pour 25 ans
Le cout de carburant	1327849.331 DZD	33196233.27 DZD

À la lumière des résultats obtenus. Le système photovoltaïque a un coût d'investissement assez élevé environ de 9185102.40 DZD, avec un cout de maintenance considérable. En revanche, le système avec motopompe à diesel a un coût d'investissement relativement faible, avec un faible cout de maintenance. En 25 ans, le prix du diesel consommé est de 33196233.27 DZD.

Nous calculons également le nombre d'années pour amortir pour le système du pompage photovoltaïque du scénario 3 :

$$N = \frac{\text{Investissement} + \text{frais de maintenance durant 25ans}}{\text{économie de carburant par an}}$$

Avec : Investissement = 9185102.4 DZD

Frais de maintenance durant 25 ans = 80549.46 × 25 = 2013736.5 DZD

$$\text{Donc : } N = \frac{9185102.4 + 2013736.5}{1327849.331} = 8,4 \text{ ans}$$

Dans cette comparaison, nous avons constaté que le retour sur investissement est de 8.4 ans pour une durée de vie de 25 ans.

III Conclusion

Le présent chapitre représente une étude du dimensionnement d'une installation du pompage solaire autonome au niveau de la wilaya de Tlemcen.

Dans un premier lieu, nous avons présenté le logiciel PVsyst utilisé dans notre étude, qui a pour avantage d'effectuer une analyse technique et une évaluation économique du projet.

En deuxième lieu, nous avons donné une description de la ferme étudiée, y compris le site géographique, les ressources en eau, le système d'irrigation et la consommation énergétique.

La partie suivante est consacrée au dimensionnement de l'installation du pompage photovoltaïque, dans laquelle nous avons développé 3 différents scénarios, afin de choisir le meilleur scénario qui répond aux besoins énergétiques de la ferme à un prix réduit. Les résultats obtenus étaient en faveur du dernier scénario, d'une puissance d'installation de 46.1 KW, qui consiste à réduire le nombre des bassins et favoriser l'irrigation gravitaire, en pompant l'eau directement du puits vers le bassin le plus élevée par rapport au reste du terrain.

Sur le plan économique, le dernier scénario fait preuve d'une installation économiquement rentable par rapport aux autres scénarios. Nous l'avons également comparé avec le système de pompage actuellement utilisé, qui nous a permis de conclure que cette solution solaire a un retour sur investissement de 8.4 ans pour une durée de vie de 25 ans.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

L'Algérie possède un potentiel énorme des ressources énergétiques renouvelables. Toutefois, l'adoption de ces énergies n'est pas encore mise en vigueur, vu la forte dépendance aux énergies conventionnelles telles que le pétrole et le gaz, malgré les enjeux et les défis qu'elles engendrent en matière de cout, de raréfaction et impacts environnementaux.

L'utilisation de l'énergie solaire présente une solution efficace, durable et économique, dans le but de subvenir aux différents besoins énergétiques dans divers secteurs énergivores, notamment le secteur agricole.

La mise en valeur de la ferme agricole autonome en électricité par le biais d'énergie photovoltaïques offre l'avantage d'optimiser sa performance et sa productivité. Pour cette raison l'utilisation des nouvelles technologies en faveur du secteur agricole permet de favoriser le développement et l'avancement des fermes.

Notre étude vise à dimensionner une installation du pompage solaire autonome, au niveau de la willaya de Tlemcen à l'aide du logiciel PVsyst, en analysant plusieurs scénarios possibles en matière d'efficacité énergétique et rentabilité économique. Il en ressort de cette étude que le dernier scénario est le plus rentable, avec un retour sur investissement estimé à 8.4 ans pour une durée de vie de 25 ans.

À l'issu de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être formulées, afin d'améliorer les résultats obtenus, en tenant compte de plusieurs paramètres techniques et économiques, à savoir :

- Simulation et conception de l'installation photovoltaïque tenant compte l'espacement et le positionnement des panneaux ;
- Dimensionnement d'une installation photovoltaïques répondant à tous les besoins énergétiques de la ferme :
- Intégration des différentes techniques visant la réduction du nombre de panneaux pour le pompage solaire ;
- Dimensionnement d'un réseau d'irrigation pour toutes les parcelles de la ferme.

Cette étude ouvre davantage la voie vers de nombreuses perspectives pour l'amélioration des fermes, dont les suivantes :

- Étude de l'impact de l'agrivoltaïsme sur la production électrique et agricole ;
- Valorisation de l'automatique, la télégestion et la domotique dans la ferme agricole.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Z. CHABANI, La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030, Mémoire de Magister, Économie de l'énergie, Université de Boumerdes, 2014, Consulté le 15/03/2022, <https://core.ac.uk/download/pdf/55514874.pdf>
- [2] M. TAGREROUT et al., Le mix énergétique : un outil de la sécurité énergétique en Algérie, 30/06/2021, Consulté le 15/03/2022, <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/277/16/1/158218>
- [3] (s.n.), Bilan énergétique national 2019, 2020, Consulté le 18/03/2022, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_national_2019_5f7b107553bcd.pdf
- [4] Algérie presse service, 2020, Pétrole: l'Algérie insiste sur la nécessité de l'application totale de l'accord de réduction, Consulté le 17/03/2022, <https://www.aps.dz/economie/104555-petrole-l-algerie-insiste-sur-la-necessite-de-l-application-totale-l-accord-de-reduction-de-la-production-par-tous-les-signataires>
- [5] (s.n.), La production d'électricité d'origine renouvelable : détails par région et par pays, 2013, Consulté le 18/03/2022, <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algerie.pdf>
- [6] Algérie presse service, 2021, CEREFÉ: la consommation énergétique nationale a augmenté de 59% en dix ans, Consulté le 18/03/2022, <https://www.aps.dz/economie/117116-cerefe-la-consommation-energetique-nationale-a-augmente-de-59-en-dix-ans>
- [7] S. AMRANI et al., Réduction de la consommation de l'énergie électrique comme pas vers la transition énergétique en Algérie : Expérience de la performance énergétique de la société algérienne de sacs et enduits (SASACE), 2021, Volume 7, N°2, 16 p, Consulté le 19/03/2022, <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/196/7/2/161152>
- [8] (s.n.), Bilan énergétique national année 2018, 2019, Consulté le 18/03/2022, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/benational_2018-edition-2019_5dac85774bce1.pdf
- [9] (s.n.), Agriculture & Environnement, 2015, Consulté le 19/03/2022, https://osez-agroecologie.org/images/imagesCK/files/bibliographie/f35_2-maitriser-energie-en-agriculture.pdf
- [10] (s.n.), Bilan énergétique national de l'année 2010, 2011, Consulté le 18/03/2022, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/benational_annee-2010_5dac35bf74826.pdf
- [11] M. FORTIER et al., L'éclairage des étables laitières, 2005, Consulté 20/03/2022, <https://www.agrireseau.net/banqueplans/feuillet/feuille%2020912.pdf>
- [12] (s.n.), Contribution prévue déterminée au niveau national CPDN – ALGERIE, 03/09/2015, Consulté 20/03/2022, <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Alg%C3%A9rie%20-INDC-%2003%20septembre%202015.pdf>
- [13] Algérie presse service, 2019, Lutte contre le changement climatique : l'engagement de l'Algérie réitéré, Consulté le 21/03/2022, <https://www.aps.dz/sante-science-technologie/98456-lutte-contre-le-changement-climatique-l-engagement-de-l-algerie-reitere>
- [14] (s.n.), Communication nationale initiale, 2001, Consulté le 21/03/2022, <https://unfccc.int/resource/docs/natc/algnc1.pdf>

Références bibliographiques

- [15] Perspective Monde, (s.d.), Émission de CO₂ en Algérie, Consulté le 22/03/2022, <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?langue=fr&codePays=DZ&codeStat=EN.ATM.CO2E.KT&codeTheme=10>
- [16] (s.n.), Rapport d'inventaire national des gaz à effet de serre, (s.d.), Consulté le 23/03/2022, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/inventaire-volume1_0.pdf
- [17] (s.n.) Ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables, 2021, Consulté le 23/03/2022, Disponible sur : https://mteer.gov.dz/index.php/fr/index.php?option=com_content&view=article&id=422&catid=35&lang=fr-FR
- [18] M. Yaiche et al., Atlas solaire algérien, (s.d.), Consulté le 24/03/2022, https://www.cder.dz/IMG/pdf/Atlas_solaire_Algerien_CDOR.pdf
- [19] (s.n.), Transition énergétique en Algérie, 2020, Consulté le 24/03/2022, https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2020/12/Rapport_CEREFEE_2020_FINAL-30-11-2020.pdf
- [20] B. Belabes et al., Évaluation du coût de production d'électricité d'origine éolienne. Cas de deux sites des hauts plateaux Algériens, Revue des Énergies Renouvelables, 2014, Volume 17, N°1, 12 p, Consulté le 24/03/2022, <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/401/17/1/121073>
- [21] Perspective monde, 2021, Algérie : vers le nucléaire... et le vert ?, Consulté le 25/03/2022, <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMAnalyse?codeAnalyse=3090>
- [23] S, DRENKARD, Étude exploratoire sur le potentiel du Power-to-X (hydrogène vert) pour l'Algérie, Novembre 2021, Consulté le 25/03/2022, https://www.energypartnership-algeria.org/fileadmin/user_upload/algeria/21_12_07_Hydrog%C3%A8ne_vert_en_Alg%C3%A9rie_-_Rapport_PE.pdf
- [24] M. BENDADA, Potentiel de la biomasse en Algérie, Génie mécanique, Université Kasdi Marbeh -Ouargla Ouar, (s.d.), Consulté le 26/03/2022, https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/8736/1/masteriales_dridi_bendada.pdf
- [25] S. Ouali et al., Étude géothermique du Sud de l'Algérie, Revue des Énergies Renouvelables, 2006, Volume 9, N° 4, 10 p, Consulté le 26/03/2022, https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v009_n4_texte_7.pdf
- [26] (s. n.), Énergies nouvelles, renouvelables et maîtrise de l'énergie, Consulté le 27/03/2022, <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [27] Djazairi, 2009, Consommation d'électricité Les lampes économiques arrivent !, Consulté le 28/03/2022, <https://www.djazairi.com/fr/info/97639>
- [28] H. Abderrezek et al., Les énergies renouvelables, un pilier de développement de l'agriculture algérienne - Cas de l'énergie éolienne, Revue des énergies renouvelables, 2016, Volume 19, N°3, 12 p, Consulté le 28/03/2022, https://www.cder.dz/download/Art19-3_15.pdf

Références bibliographiques

- [29] S. BELAID LALOUNI, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, 2015, Consulté le 30/03/2022, http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_ge-energie_solaire.pdf
- [30] Azoui, Notes de cours, 2020, Chapitre 2, Systèmes photovoltaïques, pp. 2.1-2.7, Consulté le 25/03/2022, http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_systeme_photovoltaique-partie1.pdf
- [31] Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes photovoltaïques, (s.d.), Consulté le 25/03/2022, https://unmundosalvadorsoler.org/_Files/foro/Manuel%20Pratique%20de%20petits%20syste%C3%80mes%20photovolta%C3%88ques.pdf
- [32] Document d'application technique n°10 installations photovoltaïques, (s.d.) , Consulté le 27/03/2022, https://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Panneaux_solaires.pdf
- [33] G. MOINE, L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé, 2018, Consulté le 01/04/2022, https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2018/09/art167_moine_gerard_pv_filiere_competitive.pdf
- [34] B. Flèche, D. Delagnes, Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque, 2007, Consulté le 02/04/2022, https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/Solaire-photovolta%C3%AFque/Energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [35] 1st Sunflower renewable energy, (s.d.), Quelle est la différence entre polycristallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince?, Consulté le 04/04/2022, http://www.sunflower-solar.com/index_fr.php?act=content&scheduler_id=3629
- [36] Total énergies, 2022, Les panneaux solaires nouvelle génération : présentation des avancées, Consulté le 01/014/2022, <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaiques/panneaux-solaires-nouvelle-generation>
- [37] Otovo, 2022, Nouveau panneau solaire | puissance rendement prix, Consulté le 10/04/2022, <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/panneau-photovoltaique/>
- [38] Prix-elec, 2022, Panneaux solaires nouvelle génération : panorama des avancées en 2022, Consulté le 09/04/2022, <https://prix-elec.com/energie/solaire/panneaux-nouvelle-generation>
- [39] Sustainable & renewable energy Ltd, (s.d.), Why use double glass panels?, Consulté le 11/04/2022, <http://www.srel.net/index.php/why-use-double-glass-panels/>
- [40] S. FABRÉGAT, 2021, Le solaire bifacial, à l'aube de son essor ?, Actu environnement, Consulté le 08/04/2022, <https://www.actu-environnement.com/ae/news/technologie-panneaux-solaires-photovoltaiques-bifacial-37358.php4>
- [41] Climate consulting, 2022, 5 exemples de panneaux solaires nouvelle génération, Consulté le 08/04/2022, <https://climate.selectra.com/fr/panneaux-solaires/nouvelle-generation>

Références bibliographiques

- [42] ANDY EXTANCE, 2019, First building-integrated deployment shows perovskite solar's growing maturity, Chemistry world, Consulté le 10/04/2022, <https://www.chemistryworld.com/news/first-building-integrated-deployment-shows-perovskite-solars-growing-maturity/3009953.article>
- [43] RIKEN, 2020, New flexible ultrathin organic solar cell is both highly efficient and durable, Scitechdaily, Consulté le 14/04/2022, <https://scitechdaily.com/new-flexible-ultrathin-organic-solar-cell-is-both-highly-efficient-and-durable/>
- [44] Izi by edf, 2020, Panneaux solaires : avantages et inconvénients, Consulté le 15/04/2022, https://izi-by-edf.fr/blog/panneaux-solaires-avantages-inconvenients/#Panneaux_solaires_aerovoltaiques_avantages_et_inconvenients_en_2020
- [45] Nouvelr énergie, 2022, Nouveau panneau solaire 2022 : Panorama des avancées technologiques, Consulté le 10/04/2022, <https://www.nouvelr-energie.com/pv/nouveau-panneau-solaire>
- [46] Consulté le 11/04/2022, https://www.renoovo-energies.fr/wp-content/uploads/2021/03/schema_panneau_aerovoltaique_in_sun_we_trust.jpg
- [47] Dreamstime, (s.d.), Consulté le 12/04/2022, <https://fr.dreamstime.com/graphique-montrant-des-parties-d-panneau-solaire-hybride-chauffe-eau-%C3%A9nergie-renouvelable-image-vecteur-vue-en-image154976487>
- [48] Archi Expo, (s.d.), Panneau photovoltaïque à couche mince PVL128T-PLATE 128 W, Consulté le 12/04/2022, <https://www.archiexpo.fr/prod/sunerg-solar/product-62622-1285409.html>
- [49] Lecho du solaire, 2020, Dualsun et enphase energy lancent le premier panneau pv avec micro-onduleur directement intégré par un fabricant français, Consulté le 13/04/2022, <https://www.lechodusolaire.fr/dualsun-et-enphase-energy-lancent-le-premier-panneau-pv-avec-micro-onduleur-directement-integre-par-un-fabricant-francais/>
- [50] Conseils thermiques, (s.d.), Quel est le meilleur panneau solaire ?, Consulté le 14/04/2022, <https://conseils-thermiques.org/contenu/meilleur-panneau-solaire.php>
- [51] DS new energy, 2021, Barre omnibus de cellules solaires 2BB 3BB 4BB 5BB 9BB 10BB 12BB, Consulté le 15/04/2022, <https://www.dsnsolar.com/info/solar-cell-busbar-2bb-3bb-4bb-5bb-9bb-10bb-12b-62415192.html>
- [52] F. RENAULT, 2019, Nouveau : le module optique-solaire 4x plus puissant qu'un panneau solaire, Mieux vivre autrement, Consulté le 15/04/2022, <https://www.mieux-vivre-autrement.com/nouveau-le-module-optique-solaire-4x-plus-puissant-quun-panneau-solaire.html/>
- [53] Ecoevi, Consulté le 14/04/2022, <https://ecoevi.fr/un-panneau-solaire-qui-fonctionnerait-la-nuit-est-ce-possible/>
- [54] RUKHSER, (s.d.), Don't Amaze!! Anti Solar Panels can produce clean energy at night!!, Ecwowlife, Consulté le 05/04/2022, <https://ecowowlife.com/anti-solar-panels-producing-cleaner-energy-at-night/>

Références bibliographiques

- [55] Ivan Radja, 2019, La Suisse met au point des panneaux solaires à plus haut rendement, 24 heures, Consulté le 06/04/2022, <https://www.24heures.ch/economie/suisse-met-point-panneaux-solaires-haut-rendement/story/11225494>
- [56] Happ e by engie, 2020, La tuile solaire : fonctionnement, rendement et prix, Consulté le 17/04/2022, <https://www.happ-e.fr/actualites/comment-ca-marche/tuile-solaire-fonctionnement-rendement-et-prix>
- [57] Energypedia, 2014, Building Integrated Photovoltaics (BIPV), Consulté le 10/04/2022, [https://energypedia.info/wiki/Building_Integrated_Photovoltaics_\(BIPV\)](https://energypedia.info/wiki/Building_Integrated_Photovoltaics_(BIPV))
- [58] Colibri solar, 2021, Les avantages des panneaux solaires flottants, Consulté le 09/04/2022, <https://www.colibri.solar/actualites/les-avantages-des-panneaux-solaires-flottants/>
- [59] Energie solaire, 2021, Qu'est-ce qu'une batterie solaire ? Fonctionnement et types, Consulté le 09/04/2022, <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements/batteries-solaires>
- [60] Solaris store, (s.d.), Principe de fonctionnement d'une batterie solaire, Consulté le 12/04/2022, <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>
- [61] My power énergie, 2022, Batterie solaire : fonctionnement, prix, autonomie, durée de vie, Consulté le 12/04/2022, <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/batterie-panneau-solaire.html>
- [62] Libow, (s.d.), Quels sont les différents types de batteries solaires ?, Consulté le 13/04/2022, <https://www.libow.fr/blog-avis/blog/quels-sont-les-differents-types-de-batteries-solaires-maison/>
- [63] Camping car energie, (s.d.), Les différents types de batteries, Consulté le 14/04/2022, <https://www.campingcarenergie.fr/pages/les-differents-types-de-batteries.html>
- [64] Solar reviews, 2021, What are the different types of solar batteries?, Consulté le 14/04/2022, <https://www.solarreviews.com/blog/types-of-solar-batteries>
- [65] SAFT, (s.d.), Trois technologies de batterie qui pourraient révolutionner notre futur, Consulté le 14/04/2022, <https://www.saftbatteries.com/fr/m%C3%A9dias-et-ressources/nos-histoires/trois-technologies-de-batterie-qui-pourraient-r%C3%A9volutionner-notre>
- [66] Ecosolaire, (s.d.), Les régulateurs de charge solaire : fonctions, types de régulateur, caractéristiques et guide de choix, Consulté le 16/04/2022, <https://www.ecosolaire.com/2017/10/09/regulateur-solaire/>
- [67] Le panneau solaire, (s.d.), Les différentes technologies des contrôleurs de charge, Consulté le 16/04/2022, <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-contrôleurs-charge.php>
- [68] My power énergie, 2022, Onduleur solaire : le guide complet pour tout savoir, Consulté le 16/04/2022, <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/fonctionnement-onduleur-solaire.html>

Références bibliographiques

- [69] T. GHULAM HASNAIN et al., Solar Technology in Agriculture, 16/06/2022, Consulté le 17/04/2022, <https://www.intechopen.com/chapters/77058>
- [70] Made in China, (s.d.), Pulvérisateur à énergie solaire à sac en tricot 20 L (BSS-20-2), Consulté le 17/04/2022, https://fr.made-in-china.com/co_cn-exportbases/product_20L-Knapsack-Solar-Power-Sprayer-BSS-20-2-_ryhugusgg.html
- [71] Commons wikimedia, 2021, File:Solar Powered Tractor (5872711433).jpg, Consulté le 16/04/2022, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Powered_Tractor_\(5872711433\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Powered_Tractor_(5872711433).jpg)
- [72] Low-tech, (s.d.), Séchoir solaire indirect, Consulté le 17/04/2022, https://wiki.lowtechlab.org/wiki/S%C3%A9choir_solaire_indirect
- [73] Dynamic slr, (s.d.), Applications of Solar Energy in Agriculture, Consulté le 17/04/2022, <https://www.dynamicslr.com/solar-energy-applications-in-agriculture/>
- [74] Eco info Énergies renouvelables, 2022, Serres solaires photovoltaïque mises à disposition, Consulté le 17/04/2022, <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/serres-solaires-photovoltaique-mises-a-disposition/>
- [75] X. ROJAS-ROCHA, 2015, New Breed of Solar Panels Fine-tunes Light for Crops, Our world, Consulté le 17/04/2022, <https://ourworld.unu.edu/en/new-breed-of-solar-panels-fine-tunes-light-for-crops>
- [76] Energy 4 growth hub, (s.d.), Système de pompage solaire, Consulté le 17/04/2022, <https://energy4growthhub.com/wp-content/uploads/2020/09/Factsheet-technique-pompage-solaire-version-finale.pdf>
- [77] M. SCOBIE et al., Feasibility of Solar PV Irrigation in Queensland REPORT 1: Solar Power and Solar Irrigation Systems , (s.d.), Consulté le 18/04/2022, https://www.epw.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0022/16069/usq-report-solar-power-and-irrigation-systems.pdf
- [78] Fellah trade, (s.d.), Le pompage solaire, Consulté le 10/04/2022, <https://www.fellah-trade.com/fr/filiere-developpement-durable/fiches-techniques/pompage-solaire>
- [79] Bedouelle, (s.d.), Différence entre pompe centrifuge et pompe volumétrique, Consulté le 16/04/2022, [https://bedouelledistribution.com/a/difference-entre-pompe-centrifuge-et-pompe-volumetrique-je-vous-explique-tout/#:~:text=La%20pompe%20centrifuge%20\(pompe%20cin%C3%A9tique,vitesse%2C%20va%20refouler%20ce%20fluide](https://bedouelledistribution.com/a/difference-entre-pompe-centrifuge-et-pompe-volumetrique-je-vous-explique-tout/#:~:text=La%20pompe%20centrifuge%20(pompe%20cin%C3%A9tique,vitesse%2C%20va%20refouler%20ce%20fluide)
- [80] Destock outils, (s.d.), Choisir entre une pompe immergée et une pompe de surface, Consulté le 17/04/2022, <https://www.destockoutils.fr/choisir-entre-une-pompe-immeree-ou-pompe-de-surface>
- [81] (s.n.), Irrigation et techniques d'irrigation, (s.d.), consulté le 16/04/2022, <https://fac.umc.edu.dz/fst/pdf/cours/ame/Touati/G%20R%20irrigation.pdf>

Références bibliographiques

- [82] Solaris store, (s.d.), Principe de fonctionnement d'une pompe solaire, Consulté le 17/04/2022, <https://www.solaris-store.com/content/50-principe-de-fonctionnement-d-une-pompe-solaire>
- [83] Colibri solar, (s.d.), Couplez cultures agricoles et panneaux solaires avec l'agrivoltaïsme !, Consulté le 17/04/2022, <https://www.colibri.solar/agriculteurs/agrivoltaique/>
- [84] DS new energy, 2021, Systèmes agrivoltaïques ou système photovoltaïque agricole, Consulté le 15/04/2022, <https://www.dsnsolar.com/info/agrivoltaic-systems-or-agriculture-pv-system-63877430.html>
- [85] Fermes leader, 2020, L'Agrivoltaïsme, nouvelle opportunité pour les agriculteurs ?, Consulté le 15/04/2022, <https://reseau.fermesleader.com/lagrivoltaisme-nouvelle-opportunit-e-pour-les-agriculteurs/>
- [86] Sun'Agri, (s.d.), Notre valeur ajoutée : des algorithmes pour optimiser le bien-être des plantes et l'orientation des persiennes solaires, Consulté le 16/04/2022, <https://sunagri.fr/notre-solution/technologie/>
- [87] NREL, 2019, Benefits of Agrivoltaics Across the Food-Energy-Water Nexus, Consulté le 18/04/2022, <https://www.nrel.gov/news/program/2019/benefits-of-agrivoltaics-across-the-food-energy-water-nexus.html>
- [88] Energy innovation, 2021, How "Agrivoltaics" Can Provide More Benefits Than Agriculture And Solar Photovoltaics Separately, Consulté le 18/04/2022, <https://energyinnovation.org/2021/11/01/how-agrivoltaics-can-provide-more-benefits-than-agriculture-and-solar-photovoltaics-separately/>
- [89] Oregon state university, (s.d.), Sustainable farm agrivoltaic, Consulté le 18/04/2022, <https://agsci.oregonstate.edu/newsroom/sustainable-farm-agrivoltaic>
- [90] Iberdrola, (s.d.), Agrovoltaic energy, when agriculture and renewables go hand in hand, Consulté le 18/04/2022, <https://www.iberdrola.com/innovation/agrovoltaics>
- [91] M. Ashraf Zainol Abidin et al., Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: a review, Sustainability, 2021, Volume 13, 7846, pp 3, Consulté le 18/04/2022, <file:///C:/Users/client%20hp/Downloads/sustainability-13-07846.pdf>
- [92] Fermes leader, 2020, L'Agrivoltaïsme, nouvelle opportunité pour les agriculteurs ?, Consulté le 19/04/2022, <https://reseau.fermesleader.com/lagrivoltaisme-nouvelle-opportunit-e-pour-les-agriculteurs/>
- [93] Mon panneau solaire, (s.d.), Qu'est-ce que l'agrivoltaïsme ? Décryptage, Consulté le 19/04/2022, <https://mon-panneau-solaire.info/actus/agrivoltaisme/>
- [94] My power énergie, 2021, Qu'est-ce qu'un tracker solaire & comment fonctionne-t-il ?, Consulté le 19/04/2022, <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/qu-est-ce-qu-un-tracker-solaire-comment-fonctionne-t-il.html>
- [95] Ooreka, (s.d.), Tracker solaire, Consulté le 19/04/2022, <https://panneau-solaire.ooreka.fr/astuce/voir/333303/tracker-solaire>

Références bibliographiques

- [96] J. Robinson et al., Un réflecteur de lumière pour panneaux solaires, 2007, Consulté le 20/04/2022, <https://patents.google.com/patent/CA2585756A1/fr>
- [97] N. SEGUI, 2017, Reflective solar tracker data, LinkedIn, Consulté le 20/04/2022, <https://www.linkedin.com/pulse/reflective-solar-trackers-noel-segui>
- [98] Matériel électrique, 2020, Améliorer son autoconsommation grâce à la domotique solaire, Consulté le 20/04/2022, <https://blog.materielectrique.com/domotique-solaire/>
- [99] Mutualité, (s.d.), L'internet des objets (IOT) pour une agriculture plus intelligente, Consulté le 20/04/2022, <https://www.mutualia.fr/agriculteur/infos/economie-et-societe/news/internet-des-objets-iot-pour-une-agriculture-plus-intelligente>
- [100] D. MAZILLE, Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSyst V5, (s.d.), Consulté le 04/05/2022, http://vincent.boitier.free.fr/photovoltaique/Notice%20PV%20Syst/notice_PVSyst.pdf
- [101] A. Mermoud, PVSyst user's manual, Janvier 2014, Consulté le 04/05/2022, <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/73830/download/660275/100.pdf>
- [102] PVSyst 7 help, (s.d.), Pumping systems sizing, Consulté le 04/05/2022, https://www.pvsyst.com/help/index.html?pumping_sizing.htm
- [103] (s.n.), PVSyst 7 pompage, (s.d.), Consulté le 04/05/2022, <https://www.pvsyst.com/wp-content/pdf-tutorials/pvsyst-tutorial-v7-pumping-fr.pdf>
- [104] (s.n.), Étude pour la réalisation d'un réseau goutte à goutte sur 95 hectares de vigne de cuve au niveau de l'EURL BELAIDOUNI Med située à El Fehoul daïra de Remchi – Wilaya de Tlemcen, Ets IRRIGOUTTE, 2003.
- [105] Montralec, (s.d.), Pompes, Consulté le 30/05/2022, https://www.montralec.com/public/fichiers/docs/Method_e_selection_pompes.pdf
- [106] H.LAIDOUDI, Installation Hydraulique, 2019, Consulté le 30/05/2022, <http://dspace.univ-usto.dz/bitstream/123456789/412/1/LAIDOUDI.pdf>
- [107] <http://dspace.univ-usto.dz/bitstream/123456789/412/1/LAIDOUDI.pdf>
- [108] (s.n.), (s.d.), Écoulement dans les conduites pertes de charge, Consulté le 30/05/2022, https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/pertes_de_charge.pdf
- [109] La bonne pompe, (s.d.), Pompe immergée dab srm4100mono 0,65 kw aspiration par le bas jusqu'à 6 m3/h monophasé 220v, Consulté le 30/05/2022, <https://www.labonnepompe.com/3225-pompe-immergee-dab-srm4100mono-0-65-kw-aspiration-par-le-bas-jusqu-a-6-m3-h-de-debit-monophas-220v.html>
- [110] Global tools, (s.d.), Tableau des coefficients de démarrage, Consulté le 30/05/2022, <https://www.gt-outillage.com/tableau-des-coefficients-de-demarrage.htm>
- [111] My shop solar, (s.d.), Convertisseur de tension pur sinus, Consulté le 30/05/2022, https://www.myshop-solaire.com/convertisseur-de-tension-pur-sinus- r_698_va_1.html

Références bibliographies

[112] Photovoltaïque, 18/05/2022, Connaître les coûts et évaluer la rentabilité, Consulté le 30/05/2022, <https://www.photovoltaique.info/fr/preparer-un-projet/quelles-demarches-realiser/choisir-son-modele-economique/#:~:text=Pour%20une%20installation%20de%20puissance,et%205%20%E2%82%ACHT%2FkWc>

Annexes

Annexe 1 : La consommation d'énergie par produit.

Total énergie en tep											
Produits	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Électricité	86456	91117	59865	109246	85544	118207	109349	134900	103510	157887	187222
Gaz naturel	27585	27549	36360	48780	37440	41850	48420	47970	34110	33390	20187
Gasoil	313775	354702	380815	394235	387384	410878	399514	354461	363850	358329	365784
Fuel lourd	518960	528940	548900	499000	518960	548900	578840	598800	618760	638720	658680
Total produits	946776	1002308	1025940	1051260	1029328	1119835	1136123	1136130	1120230	1188327	1231873

Annexe 2 : Consommation d'énergie du secteur de l'élevage algérien.

Total énergie en tep											
Branche	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Élevage	95476	99074	74803	135314	97629	131559	117536	146706	106210	152295	164673

Annexe 3 : Consommation énergétique par filière de culture en Algérie.

Total énergie en tep											
Branche	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Pompage/Irrigation	331035	373296	400707	415416	410939	437486	427507	386934	392110	393082	403633

Annexes

Annexe 4 : Liste des prix des dispositifs du système du pompage solaire.

 <small>Société à responsabilité limitée SARL AU CAPITAL SOCIAL DE : 60 000 000 DA R.C.M. 08/2016 #00 Siège Social : ZONE INDUSTRIELLE, DESERTTE N°03 BLOCS CHELOUANE TLEMCEN</small>							
ITEM	Q	DESCRIPTION	prix public HT	TVA	TTC	timber	TTC+timber
PANNEAUX SOLAIRE							
1	100	PANNEAUX SOLAIRE SY -M80W NEW	5 824,11	1 106,58	6 930,69	69,31	7 000,00
2	300	PANNEAUX SOLAIRE SY -M150W	3 152,18	1 738,91	10 891,09	108,91	11 000,00
3	15	PANNEAUX SOLAIRE SY -M250W	14 144,27	2 687,41	16 831,68	168,32	17 000,00
4	100	PANNEAUX SOLAIRE SY -M275 W NEW	15 392,30	2 924,54	18 316,83	183,17	18 500,00
5	100	PANNEAUX SOLAIRE SY -M320 W NEW	16 640,32	3 161,66	19 801,98	198,02	20 000,00
ONDULAURE							
6		onduleur sinus modifié SLI M300	4 576,09	869,46	5 445,54	54,46	5 500,00
7		onduleur sinus modifié 300 watt-12v	5 824,11	1 106,58	6 930,69	69,31	7 000,00
8		onduleur pur sinus 300 watt -12v	3 152,18	1 738,91	10 891,09	108,91	11 000,00
9		onduleur 224-300 watt -24V	3 984,19	1 837,00	11 881,19	118,81	12 000,00
10		onduleur 224-600 watt -24V	22 464,43	4 268,24	26 732,67	267,33	27 000,00
ITEM	Q	DESCRIPTION	prix public HT	TVA	TTC	timber	TTC+timber
12	10	onduleur pur sinus 1000 watt -12v PURE SIN new	19 136,37	3 635,91	22 772,28	227,72	23 000,00
13		Onduleur HS 2000-48V/220V	26 208,50	4 979,62	31 188,12	311,88	31 500,00
14		Onduleur HS 3000-48V/220V	55 329,06	10 512,52	65 841,58	658,42	66 500,00
15		Onduleur HS 5000-48V/220V	93 601,80	17 784,34	111 386,14	1 113,86	112 500,00
16		Onduleur HS 2000-48V/380V	85 281,64	16 203,51	101 485,15	1 014,85	102 500,00
17		Onduleur HS 3000-48V/380V	101 921,96	19 365,17	121 287,13	1 212,87	122 500,00
18		Onduleur HS 5000-48V/380V	210 084,03	39 915,97	250 000,00	2 500,00	252 500,00
REGULATEUR							
19	50	Régulateur LS2024 20A new	3 161,66	600,72	3 762,38	37,62	3 800,00
20	50	Régulateur LS3024 30A new	4 160,08	790,42	4 950,50	49,50	5 000,00
21	10	Régulateur PWM 30/48V 30A new	4 742,43	901,07	5 643,56	56,44	5 700,00
22	20	Régulateur PWM 50/48V 50A new	3 152,18	1 738,91	10 891,09	108,91	11 000,00
23		Lampe 11 watt -12v	416,01	79,04	495,05	4,95	500,00
24		Support Lampe 11W	83,20	15,81	99,01	0,99	100,00
25		Cable M 004 A (10ml)	374,41	71,14	445,54	4,46	450,00
26		Cable M 004 B (10ml)	374,41	71,14	445,54	4,46	450,00
27		Connecteur MC4 M/F NEW	208,00	39,52	247,52	2,48	250,00
28		Support Doubé 80w	6 240,12	1 185,62	7 425,74	74,26	7 500,00
ITEM	Q	DESCRIPTION	prix public HT	TVA	TTC	timber	TTC+timber
BATTERIE SOLAIRE							
29	20	batterie solaire a GEL 75Ah new	16 224,31	3 082,62	19 306,93	193,07	19 500,00
30	20	batterie solaire a GEL 85Ah new	18 304,35	3 477,83	21 782,18	217,82	22 000,00
31	20	batterie solaire a GEL 95Ah new	20 800,40	3 952,08	24 752,48	247,52	25 000,00
32	20	batterie solaire a GEL 110Ah new	24 128,46	4 584,41	28 712,87	287,13	29 000,00
33	1	batterie solaire a GEL 120Ah	28 288,54	5 374,82	33 663,37	336,63	34 000,00
34	1	batterie solaire a GEL 150Ah	35 776,69	6 797,57	42 574,26	425,74	43 000,00
35	8	batterie solaire a GEL 200Ah	44 928,86	8 536,48	53 465,35	534,65	54 000,00

Annexes

CHAUFFE EAU SOLAIRE							
36		Chauffe eau Solaire 300L en inox+ mini cuve	56 577,09	10 749,65	67 326,73	673,27	68 000,00
37		regulateur m-8 pour Chauffe eau Solaire	4 576,09	869,46	5 445,54	54,46	5 500,00
LUMINAIRE SOLAIRE							
38		Luminaire Solaire LED GKSSL-02N	28 704,55	5 453,86	34 158,42	341,58	34 500,00
39		Luminaire Solaire LED GKSSL-06N	28 288,54	5 374,82	33 663,37	336,63	34 000,00
40		Luminaire Solaire LED GKSSL-07N	56 577,09	10 749,65	67 326,73	673,27	68 000,00
ITEM	Q	DESCRIPTION	prix public HT	TVA	TTC	timber	TTC-timber
41		Luminaire Solaire LED GKSSL-08N	77 044,68	14 638,49	91 683,17	916,83	92 600,00
42		Luminaire Solaire LED GKSSL-09N	87 944,09	16 709,38	104 653,47	1 046,53	105 700,00
43		Luminaire Solaire LED GKSSL-12N	30 202,18	5 738,41	35 940,59	359,41	36 300,00
44		Luminaire Solaire LED GKSSL-14N	66 311,67	12 599,22	78 910,89	789,11	79 700,00
45		Luminaire Solaire LEDGKSM-01N	10 649,80	2 023,46	12 673,27	126,73	12 800,00
46		Luminaire Solaire LED GKSG-02N	9 152,18	1 738,91	10 891,09	108,91	11 000,00
47		Luminaire Solaire LED GKSG-04N	9 152,18	1 738,91	10 891,09	108,91	11 000,00
POMPE SOLAIRE -VARIATEUR DE POMPE							
49	12	POMPE SOLAIRE 3TSS0.76-55-24/120	49 088,94	9 326,90	58 415,84	584,16	59 000,00
50	8	POMPE SOLAIRE 5TSC28-22-110/1000	68 225,31	12 962,81	81 188,12	811,88	82 000,00
53	1	POMPE SOLAIRE 4TSSC 7.5-175-2200	104 002,00	19 760,38	123 762,38	1 237,62	125 000,00
55	9	POMPE SOLAIRE 5TSC32-38-220/2200	104 002,00	19 760,38	123 762,38	1 237,62	125 000,00
56	7	POMPE SOLAIRE 5TSC41-28-220/2200	104 002,00	19 760,38	123 762,38	1 237,62	125 000,00
57	10	POMPE SOLAIRE 5TSC61-15-220/2200	104 002,00	19 760,38	123 762,38	1 237,62	125 000,00
58	2	POMPE SOLAIRE 4TSSC20-47-220/2200	104 002,00	19 760,38	123 762,38	1 237,62	125 000,00
ITEM	Q	DESCRIPTION	prix public HT	TVA	TTC	timber	TTC-timber
60	1	POMPE SOLAIRE 4TSSC4-300-300/3000	112 322,16	21 341,21	133 663,37	1 336,63	135 000,00
61	8	POMPE SOLAIRE 5TSC30-60-300/3000	112 322,16	21 341,21	133 663,37	1 336,63	135 000,00
62	4	POMPE SOLAIRE 5TSC40-53-300/3000	112 322,16	21 341,21	133 663,37	1 336,63	135 000,00
63	7	POMPE SOLAIRE 5TSC61-26-300/3000	112 322,16	21 341,21	133 663,37	1 336,63	135 000,00
64	2	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 2,2KW 3HP	40 768,78	7 746,07	48 514,85	485,15	49 000,00
65	2	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 4KW 5HP	50 752,97	9 643,07	60 396,04	603,96	61 000,00
66	1	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 7,5KW 10HP	75 713,45	14 385,56	90 099,01	900,99	91 000,00
67	2	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 11KW 15HP	87 361,68	16 598,72	103 960,40	1 039,60	105 000,00
68	2	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 15KW 20HP	122 306,35	23 238,21	145 544,55	1 455,45	147 000,00
69	1	VARIATEUR SOLAIRE MICNO 380V 18,5KW 25HP	162 243,12	30 826,19	193 069,31	1 930,69	195 000,00

Annexe 5 : Modèles de la pompe Lorentz.



POMPE LORENTZ PSK2-21 C-SJ30-16 IMMERGÉE
5 765,67 €

TTC

Système de pompe solaire immergée pour puits 6

Gamme de systèmes
Chute max. 120 m
Débit max. 43 m³/h

Fiche technique : [Notice utilisateur PDF](#)

Quantité
1

Partager   



POMPE LORENTZ PS2-1800 CS-37-1 SURFACE
1 378,75 €

TTC

Système de pompe solaire de surface

Gamme de systèmes
Chute max. 14 m
Débit max. 36 m³/h

Fiche technique : [Notice utilisateur PDF](#)

Quantité
1



POMPE LORENTZ PS2-1800 CS-F12-2 SURFACE
1 450,24 €

TTC

Système de pompe solaire de surface

Gamme de systèmes
Chute max. 22 m
Débit max. 19 m³/h

Fiche technique : [Notice utilisateur PDF](#)

Quantité
1

Annexe 6 : Questionnaire sur la consommation d'électricité dans le secteur agricole.



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Ce questionnaire rentre dans le cadre d'un travail de recherche de Master en Énergies Renouvelables. Il s'agit de quantifier les besoins en énergies dans le domaine de l'agriculture dans la Wilaya de Tlemcen. L'objectif est de dimensionner des systèmes énergétiques à base d'énergie solaire Photovoltaïque et proposer des solutions adaptées.

Les données recueillies seront strictement à usage universitaire.

QUESTIONNAIRE SUR LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ DANS LE SECTEUR AGRICOLE

IDENTIFICATION DE LA PROPRIÉTÉ AGRICOLE

Nom de la ferme :

Nom du village :

Date de début d'activité agricole :

Superficie totale de la ferme :

Type d'approvisionnement de la ferme en électricité :

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE ANNUELLE TOTALE

Année	Forme d'énergie	Consommation trimestrielle	Coût
2019	Électricité		
	Diesel		
	Gaz naturel		
2020	Électricité		
	Diesel		
	Gaz naturel		
2021	Électricité		
	Diesel		
	Gaz naturel		

SECTEUR AGRICOLE

1) Quelle est la superficie de votre terrain cultivé ?

.....

2) Quels sont les types de votre culture ? et leurs périodes de semis et de récolte ?

Types de culture	Produits	Périodes de semis	Périodes de récolte
Légumes			
Fruits			
Céréales			
Horticulture			
Industrielle			
Autres			

3) À quelle heure arrosez-vous vos plantes ?

En hiver :

En été :

4) Quelle est votre consommation annuelle d'électricité pour l'agriculture ?

Consommation :

Coût :

5) En quels mois (ou trimestres) consommez-vous le plus d'électricité ?

.....

SECTEUR SERRICOLE

6) Quelle est la superficie de votre serre agricole ?

.....

7) Quels sont les types de votre culture ? et leurs périodes de semis et de récolte ?

Types de culture	Produits	Périodes de semis	Périodes de récolte
Légumes			
Fruits			
Céréales			
Horticulture			
Industrielle			
Autres			

8) À quelle heure arrosez-vous vos plantes ?

En hiver :

En été :

9) Utilisez-vous des lampes pour l'éclairage de photosynthèse ?

Types de lampes	Oui		Non
	Nombre	Durée d'utilisation en heures/jour	
À incandescence			
LED			
CFL			
Néon			

10) Utilisez-vous des systèmes électriques pour le chauffage, la ventilation et la climatisation ?

Systèmes électriques	Oui		Non
	Période d'utilisation (mois)	Durée d'utilisation (heures/jour)	
Chauffage			
Ventilation			
Climatisation			

11) Quelle est votre consommation annuelle d'électricité pour la serre agricole ?

Consommation :

Cout :

12) En quels mois (ou trimestres) consommez-vous le plus d'électricité ?

.....

IRRIGATION ET POMPAGE

13) Quelle est votre source d’approvisionnement en irrigation ?

- Rivière et oued Forage Réseau de l’eau potable

14) Quelle est la profondeur de votre forage si vous l’utilisez comme source d’approvisionnement en irrigation ?

.....

15) Quel est votre système d’irrigation installé ?

- Goute à goutte Par aspersion Gravitaire

16) Quel est le diamètre et la longueur de votre canalisation utilisée pour le pompage ?

.....

17) Quel est le type de moteur de votre pompe ?

- Moteur électrique Moteur à essence

18) Quelle est la puissance de votre pompe ?

.....

19) Combien d’heures utilisez-vous la pompe par jour ?

.....

SECTEUR DE PRODUCTION LAITIÈRE ET L'ÉLEVAGE DE BOVINS

20) Quelle est la superficie de votre bâtiment d'élevage de bovins ?

.....

21) Quel est le nombre de vos bovins élevés ?

Nombre de vaches :tête de bétail

Nombre des autres bovins :tête de bétail

22) Quel est le type de votre production bovine ?

Production de viande

Production de lait

23) Utilisez-vous les équipements électriques suivants :

Équipements électriques	Oui			Non
	Nombre	Période d'utilisation (mois)	Durée d'utilisation (heures/jour)	
Machine à traire				
Tank à lait (réfrigérateur de lait)				
Chauffe-eau				
Équipements de nettoyage				
Équipements de distribution d'aliments				
Équipements d'abreuvement				
Chauffage				
Climatiseur				
Ventilateur				

24) Quel est le type, le nombre et la durée d'utilisation des lampes utilisées pour l'éclairage de votre bâtiment d'élevage de bovins ?

Types de lampes	Nombre	Durée d'utilisation en heures/jour
À incandescence		
LED		
CFL		
Néon		

25) Quelle est votre consommation annuelle d'électricité pour votre bâtiment d'élevage de bovins ?

Consommation :

Cout :

26) En quels mois (ou trimestres) consommez-vous le plus d'électricité ?

.....

SECTEUR AVICOLE

27) Quelle est la superficie de votre bâtiment avicole ?

.....

28) Quel est le nombre de vos volailles élevées ?

.....

29) Utilisez-vous les équipements électriques suivants :

Équipements électriques	Oui			Non
	Nombre	Période d'utilisation (mois)	Durée d'utilisation (heures/jour)	
Couveuse à œufs				
Équipements de nettoyage				
Équipements de distribution d'aliments				
Équipements d'abreuvement				
Chauffage				
Climatiseur				
Ventilateur				

30) Quel est le type, le nombre et la durée d'utilisation des lampes utilisées pour l'éclairage de votre bâtiment avicole ?

Types de lampes	Nombre	Durée d'utilisation en heures/jour
À incandescence		
LED		
CFL		
Néon		

31) Quelle est votre consommation annuelle d'électricité pour votre bâtiment avicole ?

Consommation : Cout :

32) En quels mois (ou trimestres) consommez-vous le plus d'électricité ?

.....

