

Simulation d'un système intelligent de pompage photovoltaïque pour l'irrigation : cas de la tomate en Côte d'Ivoire

Serge Mouroufié ADOU*, Alexandre N'GUESSAN, Désiré Kakou KOUASSI, Daouda KONE, Kouadio Frégis N DRI et Abé Simon YAPI

Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Sciences des Structures de la Matière et de Technologie, Laboratoire de Technologie, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

(Reçu le 19 Novembre 2025 ; Accepté le 19 Janvier 2026)

* Correspondance, courriel : ousmaneseidou@yahoo.fr

Résumé

Dans la plupart des pays en développement, tels que la Côte d'Ivoire, l'agriculture en zone rurale dépend majoritairement des pluies saisonnières. Cette situation rend les cultures vulnérables aux aléas climatiques et limite la productivité. Les systèmes classiques de pompage, souvent utilisés, emploient des combustibles fossiles, avec des coûts élevés sur le long terme et un impact environnemental non négligeable. L'énergie photovoltaïque constitue l'une des solutions pour une agriculture durable malgré son faible rendement et son coût d'installation élevé. Cependant, son exploitation nécessite une gestion optimisée. La présente étude porte sur la conception et la simulation d'un système de pompage solaire intelligent intégrant un capteur d'humidité du sol. La chaîne photovoltaïque de pompage d'eau a été modélisée à l'aide du logiciel Matlab et des données solaires obtenues à partir de PVSyst. Le système intelligent est appliqué à la culture de la tomate à Pacobo dans le département de Tiassalé, une localité située à une centaine de kilomètre d'Abidjan en Côte d'Ivoire. Un cycle complet de 105 jours, subdivisé en quatre phases a été simulé. Les données climatiques issues de PVSyst ont permis de déterminer une irradiation moyenne annuelle de 4,74 kWh/m²/jour et une température moyenne de 27,4 °C. Les résultats montrent que ce système intelligent d'irrigation solaire permet une gestion hydrique et énergétique optimale grâce à l'intégration du capteur d'humidité avec une meilleure maîtrise de la consommation d'eau par rapport aux méthodes classiques. L'humidité du sol est maintenue à un niveau stable compris entre 55 % et 65 %. Le système assure une meilleure autonomie énergétique avec l'énergie photovoltaïque. La simulation valide la faisabilité et l'efficacité de ce système avec en perspective, la réalisation d'un prototype et une expérimentation sur site. De plus, comparativement à un système classique alimenté par un groupe électrogène, il n'y a pas d'émission directe de CO₂, contribuant à la préservation de l'environnement.

Mots-clés : *irrigation, système photovoltaïque, système intelligent de pompage, culture de la tomate.*

Abstract

Simulation of an intelligent photovoltaic pumping system for irrigation : the case of tomatoes in Ivory Coast

In most developing countries, such as Côte d'Ivoire, rural agriculture relies predominantly on seasonal rainfall. This situation makes crops vulnerable to climatic hazards and limits productivity. Conventional pumping systems frequently used employ fossil fuels, resulting in high long-term costs and a non-negligible environmental impact. Photovoltaic (PV) energy is one of the solutions for sustainable agriculture, despite its low efficiency and high installation cost. However, its operation requires optimized management. The present study aims to design and simulate an intelligent solar pumping system integrating a soil moisture sensor. The photovoltaic water pumping chain was modeled using the Matlab software and solar data obtained from PVSyst. The intelligent system is applied to tomato cultivation in Pacobo, in the department of Tiassalé, a locality located about a hundred kilometers from Abidjan, Côte d'Ivoire. A full cycle of 105 days, subdivided into four phases, was simulated. Climatic data obtained from PVSyst made it possible to determine an average annual irradiation of 4.74 kWh/m²/day and an average temperature of 27.4 °C. The results show that this intelligent solar irrigation system allows for optimal water and energy management thanks to the integration of the moisture sensor, resulting in better control of water consumption compared to conventional methods. The soil moisture is maintained at a stable level between 55 % and 65 %. The system ensures better energy autonomy using photovoltaic power. The simulation validates the feasibility and effectiveness of this system, with the future prospect of building a prototype and performing on-site experimentation. Furthermore, compared to a conventional system powered by a generator set (or diesel generator), there is no direct CO₂ emission, contributing to environmental preservation.

Keywords : *irrigation, photovoltaic system, smart pumping system, tomato cultivation.*

1. Introduction

La production agricole joue un rôle important dans la sécurité alimentaire [1]. Elle consomme environ 70 % du prélèvement total d'eau douce et 80 à 90 % de la consommation humaine d'eau à l'échelle mondiale [1]. En Afrique, les activités agricoles dépendent fortement des précipitations [2], qui deviennent de plus en plus imprévisibles [3] à cause du changement climatique. Pourtant, l'humidité du sol est un paramètre important qui influence la croissance végétative des plantes [4, 5]. Un approvisionnement en eau insuffisant ou irrégulier affecte fortement le rendement des cultures maraîchères [6, 7]. Le stress hydrique (réduction de l'humidité du sol) impacte négativement la croissance des plantes [4]. Il peut être atténué par une stabilité de l'humidité du sol pendant la croissance des plantes [3, 5]. Il est important de maintenir une bonne humidité du sol tout en évitant la stagnation de l'eau [6, 7]. L'eau représente ainsi un élément important pour la croissance des plantes [8]. La gestion de l'eau et de l'énergie constitue un enjeu majeur pour la durabilité de l'agriculture en Afrique. Le développement du photovoltaïque (PV) offre une alternative durable, permettant l'autonomie énergétique et la réduction des coûts d'exploitation [2, 9]. Il permet également de répondre aux besoins énergétiques croissants et de lutter contre le réchauffement climatique [2, 8]. Le pompage photovoltaïque (PV) de l'eau est l'une des solutions simples et adaptées, utilisées dans les pays en développement [8, 10, 11] pour répondre à cette problématique. En effet, vu les difficultés liées à l'approvisionnement en eau dans certains milieux ruraux tant pour l'eau potable que pour les besoins d'irrigation, il est nécessaire de développer et de promouvoir le secteur du pompage solaire. Le pompage photovoltaïque de l'eau est l'une des applications les plus prometteuses de l'énergie photovoltaïque [2, 8, 9, 12, 13]. Comparativement au système classique alimenté par des moteurs diesel, la production d'énergie

photovoltaïque présente de meilleures performances environnementales et économiques avec un retour sur investissement estimé de 4 à 5 ans [2]. Le carburant et les lubrifiants utilisés pour les systèmes de pompage au diesel polluent souvent les puits, les sols et les eaux souterraines [13]. En Côte d'Ivoire, la production maraîchère dépend tout aussi fortement des conditions climatiques et de la disponibilité énergétique [14]. Depuis plusieurs années, on observe une irrégularité du climat avec l'apparition de poches de sécheresse ou de périodes d'excès de pluies [14]. Ces phénomènes extrêmes freinent le développement de l'agriculture vivrière [14]. La présente étude vise à concevoir et simuler un système de pompage solaire intelligent intégrant un capteur d'humidité du sol. Ce système, équipé d'un capteur, permet d'améliorer la productivité et d'utiliser efficacement les ressources afin de permettre une irrigation en temps réel en fonction des besoins spécifiques des cultures [1]. Ce travail propose un modèle de système de pompage d'eau photovoltaïque, afin d'analyser ses différents comportements. La chaîne photovoltaïque de pompage d'eau a été modélisée à l'aide du logiciel Matlab, à partir du besoin en eau d'une ferme de culture maraîchère et des données solaires obtenues à partir de PVSyst. Le système intelligent est appliqué à la culture de la tomate riche, en vitamines C et E, en antioxydants et en minéraux [14]. Un cycle complet de 105 jours, subdivisé en quatre phases [6] a été simulé à Pacobo dans le département de Tiassalé, une localité située à une centaine de kilomètres d'Abidjan en Côte d'Ivoire. L'objectif est d'évaluer la cohérence entre l'irradiation solaire, la demande hydrique et la performance du système de pompage PV. In fine, ce travail permettra de concevoir des systèmes réels de pompage solaire performants et fiables.

2. Matériel et méthodes

2-1. Outils numériques

Dans cette étude, deux logiciels ont été utilisés. Le logiciel PVSyst a été utilisé pour concevoir et simuler le comportement opérationnel d'un système photovoltaïque de pompage d'eau [2, 8]. Ce logiciel a permis de connaître les données environnementales du site. Il dispose de bonnes fonctionnalités pour faciliter la conception des systèmes PV, d'estimer la quantité d'énergie produite [8] et faire des choix judicieux d'équipements (pompe, onduleur, modules PV). Le logiciel Matlab a été utilisé pour simuler le système avec l'introduction d'un capteur d'humidité. Ce capteur est précieux pour optimiser le système et maintenir un taux d'humidité adéquat. Il permet également d'éviter le gaspillage d'eau et d'énergie.

2-2. Données du site d'étude

Certaines données environnementales de la zone d'étude sont nécessaires pour répondre aux besoins quotidiens en eau des plantes [8]. Plusieurs facteurs tels que le besoin en eau, la source d'eau, l'ensoleillement et la hauteur manométrique dynamique influencent le choix des systèmes photovoltaïques de pompage d'eau [8]. Pour la présente étude, le site est situé à Pacobo, dans le département de Tiassalé, au centre de la Côte d'Ivoire. Pacobo est situé à environ 125 km d'Abidjan et 148 km de Yamoussoukro. Les données climatiques (irradiation, température, vent) ont été obtenues à partir de PVSyst. L'irradiation moyenne annuelle est de 4,74 kWh/m²/jour et la température moyenne de 27,4 °C. Le **Tableau 1** nous donne les coordonnées géographiques du site d'étude. Le **Tableau 2** recense les données relatives aux valeurs moyennes de l'irradiation solaire globale, l'irradiation diffuse, la température ambiante et la vitesse du vent. Ces données ont une influence significative sur les performances des systèmes photovoltaïques [8].

Tableau 1 : Coordonnées géographiques du site d'installation

Paramètre	Valeur
Latitude	6,1674 °
Longitude	-4,9372 °
Altitude (au-dessus du niveau de la mer)	113 m

Tableau 2 : Les données d'irradiation du site

	Irradiation globale kWh/m ² .jr	Irradiation diffuse kWh/m ² .jr	Température ambiante °C	Vitesse du vent m/s
Janvier	4,74	2,81	27,5	2,39
Février	4,89	3,03	28,8	3,21
Mars	5,25	3,08	29,3	3,50
Avril	5,37	2,85	28,3	3,20
Mai	5,25	2,65	28,1	2,69
Juin	4,46	2,73	26,2	2,80
Juillet	3,95	2,48	26,0	3,80
Août	3,76	2,60	25,3	4,00
Septembre	4,31	2,36	25,7	3,60
Octobre	4,97	2,60	27,1	2,79
Novembre	5,30	2,35	27,7	2,60
Décembre	4,66	2,47	28,2	2,50
Moyenne annuelle	4,74	2,67	27,4	3,09

2-3. Besoins en eau

Dans l'étude de cas, l'eau pompée servira à l'irrigation d'une ferme de tomates d'une superficie de 1000 m². Selon le **Tableau 3** [15, 16], le besoin en eau pour les cultures maraîchères est de 60 m³/jour par hectare. Pour la superficie retenue (0,1 hectare), le besoin en eau théorique est donc de 6 m³/jour. Cependant, en tenant compte des différentes phases de développement de la plante et des pertes probables, il a été décidé de prévoir un volume légèrement supérieur de 7 m³/jour. Une simulation Matlab a été réalisée sur un cycle de 105 jours, correspondant aux quatre phases de développement de la tomate [6] :

- Phase initiale : 12 jours ;
- Développement : 26 jours ;
- Mi-saison : 39 jours ;
- Fin de saison : 28 jours.

L'évapotranspiration a été calculée à partir des données expérimentales moyennes de 2022 et 2023 recueillies par [6]. La variation de l'humidité du sol a été estimée selon les pertes journalières et l'efficacité du système d'irrigation utilisé. Le **Tableau 3** présente les besoins en eau de plusieurs cultures notamment le riz, les graines, la canne à sucre, le coton et les cultures maraîchères.

Tableau 3 : Besoins en eau pour diverses cultures

Type de culture	Besoin en eau
Riz	100 m ³ /jour/ha
Graines	45 m ³ /jour/ha
Canne à sucre	65 m ³ /jour/ha
Coton	55 m ³ /jour/ha
Culture maraîchères	60 m ³ /jour/ha

2-4. Système de pompage PV

Le système étudié comprend un champ photovoltaïque de 2 kWc alimentant une pompe centrifuge AC, destinée à élever l'eau sur une hauteur manométrique totale de 15 m. L'eau pompée est stockée dans un réservoir de 7 m³, assurant deux arrosages quotidiens : 40 % le matin (entre 5 h 30 et 7 h 30) et 60 % le soir (entre 17 h et 18 h 30). La **Figure 1** [8, 15, 16] présente la configuration d'un système de pompage photovoltaïque. L'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques correspond généralement à la latitude du site. Toutefois, en termes de production énergétique annuelle, il n'existe pas de différence significative à $\pm 5^\circ$ autour de l'angle d'inclinaison optimal [8]. Dans cette étude, l'angle d'inclinaison a été fixé à 10° , afin de favoriser l'auto-nettoyage des modules photovoltaïques. Un capteur d'humidité du sol permet la régulation automatique du pompage. Le système est conçu sans batteries, afin de minimiser le coût d'installation [15]. Le réservoir d'eau est utilisé comme moyen de stockage de l'énergie sous forme hydraulique, en remplacement du stockage électrique par batteries [9, 11, 15]. Toutefois, une batterie de faible capacité est utilisée exclusivement pour l'alimentation du capteur d'humidité. Les modules photovoltaïques produisent une énergie électrique en courant continu, laquelle est convertie par un convertisseur statique afin d'alimenter un groupe motopompe immergé fonctionnant avec du courant alternatif [15]. Le groupe motopompe est composé d'un moteur à courant alternatif, couplé à une pompe centrifuge à étages multiples [16]. La pompe centrifuge transmet l'énergie mécanique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes, permettant ainsi l'élévation de l'eau [15].

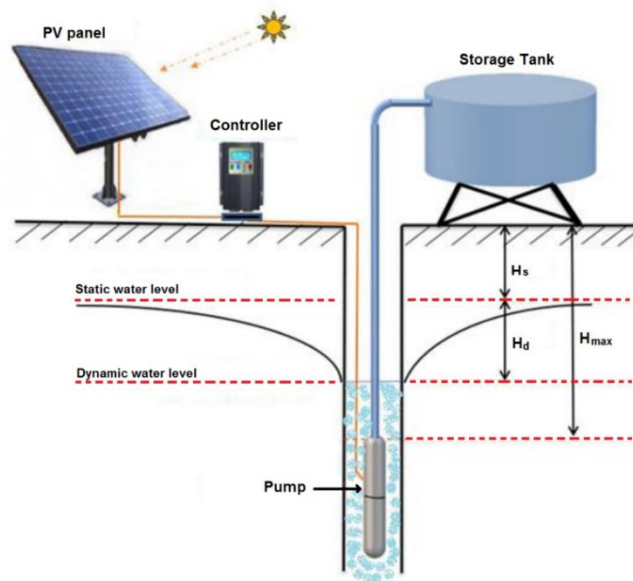


Figure 1 : Configuration d'un système de pompage solaire

2-4-1. Capteur d'humidité

Un capteur de type TDR (réflectométrie dans le domaine temporel) [1] a été inséré dans le modèle. Il permet de déterminer avec une grande précision la teneur en humidité du sol. Ce capteur d'humidité du sol à deux sondes est inséré dans le sol à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm et 20 cm), correspondant respectivement aux phases initiale, végétative et de maturité de la culture [1]. La sonde du capteur fournit une tension de sortie analogique comprise entre 0,06 volt à 5 volts, proportionnelle à la teneur en humidité du sol, vers l'unité PLC (contrôleur logique programmable). Le PLC acquiert les données analogiques et les convertit en valeurs numériques correspondant à la teneur en humidité du sol [1].

2-4-2. Calcul de l'énergie quotidienne requise

L'énergie quotidienne requise pour élever une certaine quantité d'eau à une hauteur donnée est calculée à partir du débit journalier et de la Hauteur Manométrique Totale (HMT). Ce calcul dépend d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé. La **Figure 2** [15, 16], présente les données de base nécessaires au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

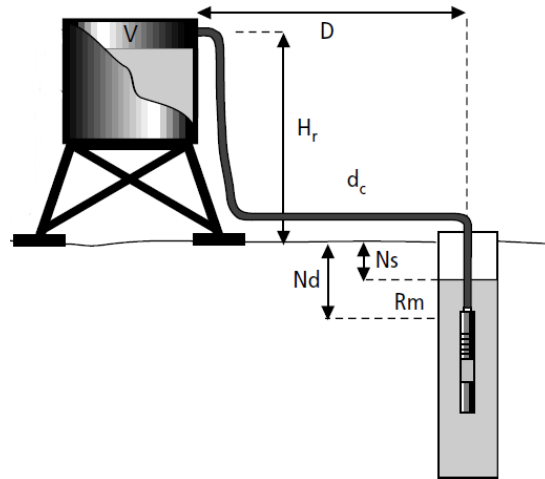


Figure 2 : Données de base d'un système de pompage

✓ Le débit

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné [15, 16]. En pompage solaire, le débit représente le besoin journalier en eau, souvent exprimé en $m^3/jour$ en fonction de la superficie à irriguer. Dans le cas d'étude d'une culture de tomate sur une surface de $1000 m^2$, le débit requis est de $6 m^3/jour$. Ce débit est porté à $7 m^3$ afin de tenir compte des pertes éventuelles.

✓ Niveau statique

Le niveau statique (N_s) d'un puit ou d'un forage correspond à la distance entre le sol et la surface de l'eau avant le démarrage du pompage.

✓ Niveau dynamique

Le niveau dynamique (N_d) d'un puit ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau pendant le pompage, pour un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est généralement évalué pour un débit moyen.

✓ Le rabattement

Le rabattement correspond à la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique. Le paramètre R_m est le rabattement maximal admissible, au-delà duquel la pompe doit être arrêtée.

✓ La hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe correspond à la différence de pression, exprimée en mètre de colonne d'eau, entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée à l'aide des **Relations** suivantes [15] :

$$HMT = H_g + H_c \quad (1)$$

$$H_g = H_r + N_d \quad (2)$$

où, H_g est la hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation ; H_c représente les pertes de charge dues au frottement de l'eau sur les parois des conduites ; celle-ci sont généralement estimées à 10 % de H_g ; H_r est la hauteur à laquelle est située le réservoir d'eau par rapport au sol ; N_d est le niveau dynamique de la nappe d'eau lors du pompage.

Le **Tableau 4** présente les caractéristiques du forage simulé

Tableau 4 : Caractéristiques du forage

Paramètre	Valeur (m)
Niveau statique	10 m
Rabatement (Rm)	10 m
Niveau dynamique	20 m
Hauteur réservoir (Hr)	05 m
Pertes de charge (Hc)	0,25

✓ La puissance hydraulique théorique [15, 16]

La puissance hydraulique théorique nécessaire P_{th} est [15, 16] :

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot HMT \quad (3)$$

avec,

- P_{th} : la puissance hydraulique théorique en W
- ρ : la masse volumique de l'eau ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) ;
- g : la constante de la gravité ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ;
- Q : le débit volumique d'eau en m^3/s ;
- HMT : la hauteur manométrique totale en mètre.

Cette puissance hydraulique peut aussi être exprimée de la manière suivante :

$$P_{th} = C_H \cdot Q \cdot HMT \quad (4)$$

où,

- Q est le débit volumique d'eau en mètre cube par heure m^3/h ;
- HMT est la hauteur manométrique totale en mètre ;
- C_H est la constante hydraulique :

$$C_H = \rho \cdot g / 3600 = 2,725 \text{ kg.s.h/m}^2 \quad (5)$$

Le calcul de la puissance théorique P_{th} permet de sélectionner une pompe appropriée, capable de fournir le débit requis pour la HMT considérée. La puissance électrique réelle P_e requise par le groupe motopompe est alors déterminée à l'aide de l'**Équation** suivante :

$$P_e = \frac{P_{th}}{\eta_p} \quad (6)$$

En général le rendement des groupes motopompes varie entre 30 % et 45 %, selon le type de pompe et de moteur utilisé.

$$\eta_p = \eta \cdot \eta' \quad (7)$$

avec,

- η : rendement de la pompe ;
- η' : rendement du moteur.

Pour la modélisation, le choix s'est porté sur une pompe immergée, associée à un moteur à courant alternatif (AC). Le rendement de la pompe (η) est de 55 %, tandis que celui du moteur AC (η') est estimé à 80 % au point de fonctionnement nominal. Le rendement global du groupe motopompe (η_p) est donc de 44 %. L'énergie électrique E_{el} consommée pendant le temps de pompage journalier T_{Pomp} est donné par :

$$E_{el} = P_e \cdot T_{Pomp} \quad (8)$$

Le temps de pompage T_{Pomp} est pris égale à 5 h dans le cas général pour un fonctionnement journalier. Il est supposé que l'ensoleillement solaire soit disponible pendant au moins 5h par jour. L'énergie électrique E_{el} représente la charge à alimenter dans un système de pompage photovoltaïque.

2-4-3. Détermination du champ photovoltaïque (PV)

Pour le bon fonctionnement du système photovoltaïque, il est nécessaire de respecter l'équilibre entre l'énergie produite et l'énergie consommée. L'énergie consommée journalièrement doit être inférieure ou égale à l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Cependant, lorsque l'énergie produite est largement supérieure à l'énergie consommée, il y a surdimensionnement du système, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires inutiles. L'énergie E_p que doit fournir le champ photovoltaïque à installer est donné par :

$$E_p = \frac{E_{el}}{K} \quad (9)$$

où,

- E_p est l'énergie journalière à produire par le système, exprimée en Wh/jour ;
- K est le coefficient correcteur tenant compte des incertitudes météorologiques, de l'inclinaison des modules et du rendement global du système PV. Il varie entre 0,50 et 0,8 ; une valeur moyenne de 0,65 est retenue dans cette étude.

La puissance crête P_c du champ photovoltaïque à installer est donnée par :

$$P_c = \frac{E_p}{I_r} \quad (10)$$

Une valeur de $I_r = 3,76 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ est retenue, correspondant à l'irradiation solaire la plus faible de la zone d'étude.

3. Résultats et discussion

3-1. Dimensionnement

Une puissance crête de 1801,56 Wc, soit environ 1,8 kWc, est nécessaire pour le fonctionnement autonome du système. Le choix s'est porté sur quatre (4) modules solaires de 500 Wc, correspondant à une puissance crête installée de 2 kWc, largement suffisante pour couvrir les besoins énergétiques du système. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par [15, 16]. Le champ photovoltaïque de 2 kWc permet de produire une énergie journalière supérieure à la consommation du groupe motopompe, assurant ainsi une autonomie énergétique complète du système. Le choix d'un stockage hydraulique via un réservoir d'eau, en remplacement des batteries électriques, présente un avantage économique et environnemental significatif. Cette configuration réduit les coûts d'investissement et de maintenance, tout en augmentant la durée de vie globale du système [17]. Elle est particulièrement adaptée aux zones rurales, où l'accès aux batteries reste limité avec une maintenance difficile à réaliser [9, 11]. Le **Tableau 5** présente les résultats du dimensionnement réalisé pour la culture de la tomate sur une superficie de 1000 m².

Tableau 5 : Résultats du dimensionnement utilisés pour la modélisation

Paramètre	Valeur
Surface cultivée	1000 m ²
Besoin en eau	7 m ³ /jour
Ensoleillement du site	3,76 kWh/m ² /jour
HMT	25 m
Puissance théorique P _{th}	476,88 W
Puissance électrique P _e	1083,82 W
Énergie électrique E _{el}	5419,10 Wh
Énergie produite E _p	6773,88 Wh
Puissance crête P _c	1801,56 Wc

3-2. Irradiation et température

La **Figure 3** présente l'irradiation globale et la température moyenne mensuelle enregistrées sur le site d'étude de Pacobo en Côte d'Ivoire. Les résultats issus du logiciel PVsyst indiquent une irradiation maximale de 5,37 kWh/m²/jour entre les mois de mars et avril, période précédant la petite saison des pluies. La température moyenne enregistrée durant cette période est de 29 °C. En juillet et août, l'irradiation solaire diminue à 3,76 kWh/m²/jour, en raison d'une couverture nuageuse plus importante. Cette tendance met en évidence une corrélation directe entre l'irradiation solaire et la température, influençant à la fois la photosynthèse des cultures et la quantité d'énergie solaire disponible pour le pompage photovoltaïque. Les variations de l'irradiation solaire influencent directement la puissance électrique disponible. Malgré une baisse de l'irradiation à 3,76 kWh/m²/jour durant la période couvrant les mois de juillet et août, la puissance crête installée (2 kWc) demeure suffisante pour satisfaire les besoins énergétiques journaliers du système. Ces résultats confirment que le dimensionnement adopté présente une marge de sécurité énergétique, garantissant la continuité de fonctionnement du système même en période de faible ensoleillement. Des observations similaires ont été rapportées par [2, 8], qui soulignent l'importance du surdimensionnement modéré pour assurer la fiabilité des systèmes de pompage photovoltaïque en zone tropicale.

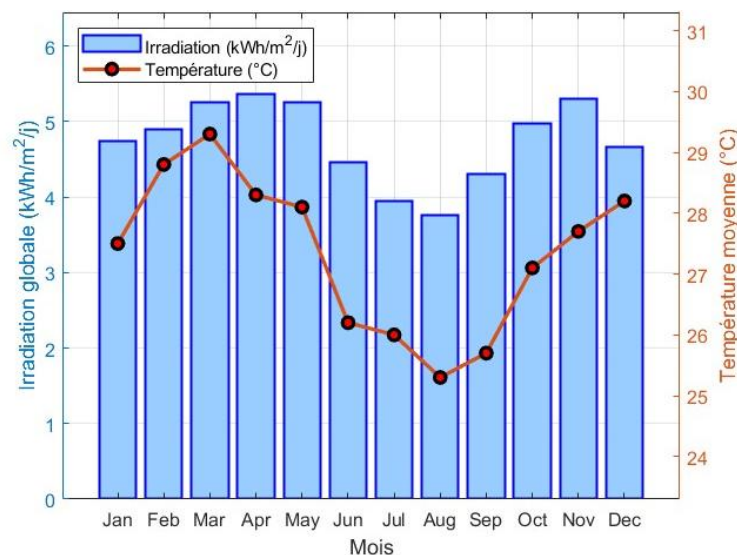


Figure 3 : Irradiation globale et température moyenne mensuelle à Pacobo en Côte d'Ivoire

3-3. Évapotranspiration et besoins en eau

La **Figure 4** illustre l'évolution de l'évapotranspiration (ET) au cours des quatre phases de développement de la tomate. L'ET moyenne varie de 2,3 mm/jour en phase initiale à 6,64 mm/jour en mi-saison, puis décroît à 6,2 mm/jour en fin de cycle. Le coefficient cultural K_c varie entre 0,6 et 1,2, conformément aux recommandations de l'Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture (Food and Agriculture Organization, FAO) dans son guide sur l'irrigation et le drainage [18]. Ce coefficient K_c dépend principalement du type de culture et de son stade de développement [18]. Ces résultats confirment que la mi-saison correspond à la période de forte activité physiologique, impliquant une demande hydrique maximale. L'augmentation progressive de l'évapotranspiration jusqu'à la phase de mi-saison traduit l'intensification de l'activité physiologique de la tomate, caractérisée par un développement foliaire important et une transpiration accrue. Cette phase correspond ainsi à une demande hydrique maximale, confirmant les valeurs recommandées par la FAO [18]. L'intégration du capteur d'humidité permet d'adapter automatiquement l'apport en eau à cette variabilité saisonnière, contrairement aux méthodes d'irrigation conventionnelles basées sur des volumes fixes. Cette approche réduit significativement le risque de stress hydrique ou de sur-irrigation, tel que souligné par [5].

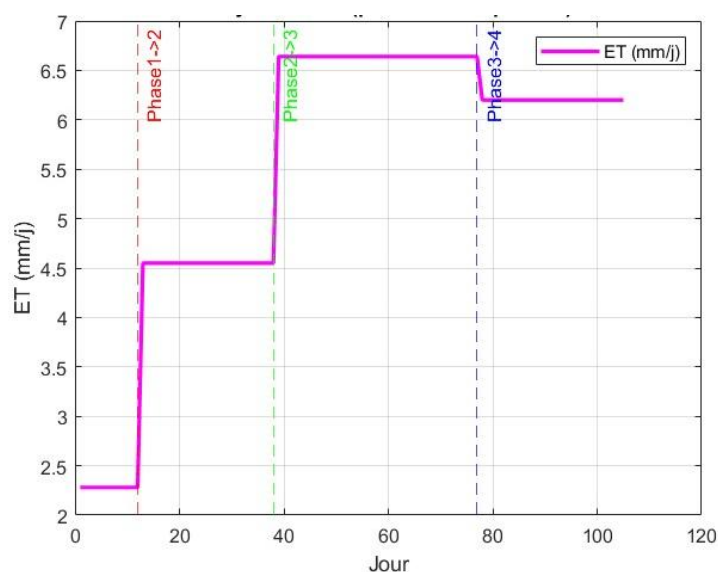


Figure 4 : Évapotranspiration journalière

3-4. Évolution de l'humidité du sol

La simulation du système d'irrigation indique que l'humidité moyenne du sol reste stable entre 55 % et 65 % tout au long du cycle de la culture. Les seuils d'irrigation sont respectés grâce au déclenchement automatique de la pompe dès que l'humidité du sol, descend en dessous de 55 %. Cette régulation assurée par le capteur d'humidité, permet de maintenir un équilibre hydrique optimal, évitant à la fois le stress hydrique pour la plante et le gaspillage d'eau. Cette stabilité hydrique est cohérente avec les travaux récents portant sur des systèmes d'irrigation photovoltaïques intelligents, où l'utilisation de capteurs permet de maintenir l'humidité du sol dans une plage optimale, tout en réduisant les pertes [19, 20]. Contrairement aux systèmes d'irrigation classiques fonctionnant sur des plages horaires fixes, le système proposé assure une régulation en temps réel, alignée sur les besoins physiologiques réels de la plante. Cette régulation contribue à limiter les pertes par percolation profonde et évaporation, améliorant ainsi l'efficacité globale de l'utilisation de l'eau. Les résultats obtenus confirment que l'intégration d'un capteur d'humidité du sol constitue un élément clé pour une irrigation intelligente et efficiente. Des études récentes ont montré que les systèmes photovoltaïques couplés à des capteurs d'humidité permettent une régulation automatique fiable de l'irrigation, améliorant à la fois la gestion de l'eau et l'autonomie énergétique du système [1, 19]. La **Figure 5** montre que le champ photovoltaïque de 2 kWc couvre largement les besoins énergétiques du système de pompage. L'autonomie fournie par le réservoir assure la disponibilité de l'eau même pendant les périodes de faible ensoleillement, garantissant la continuité de l'irrigation.

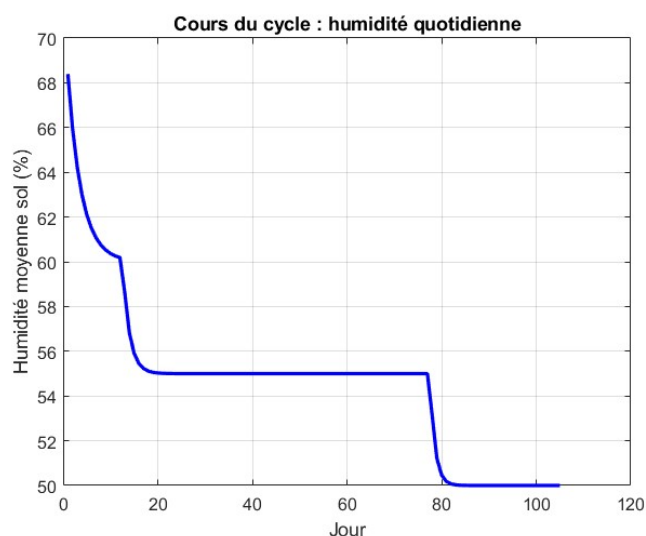


Figure 5 : Humidité quotidienne

4. Conclusion

L'étude montre que l'association d'un système photovoltaïque de 2 kWc à une pompe centrifuge AC pour l'irrigation de la tomate à Pacobo assure une autonomie énergétique complète et une gestion hydrique optimisée. La présence d'un capteur d'humidité du sol, permet au système de maintenir le niveau d'humidité du sol stable entre 55 % et 65 %, garantissant un équilibre hydrique optimal. Les résultats obtenus confirment la faisabilité technique et énergétique d'un système de pompage photovoltaïque intelligent pour l'irrigation maraîchère en Côte d'Ivoire. L'intégration d'un capteur d'humidité constitue un levier essentiel pour améliorer l'efficacité hydrique et énergétique, positionnant ce système comme une solution durable et adaptée aux contextes agricoles des pays en développement. Ces résultats s'inscrivent dans la dynamique

actuelle de développement des systèmes d'irrigation intelligents alimentés par l'énergie photovoltaïque. De plus, ce système ne génère aucune émission de gaz à effet de serre, ce qui contribue à la durabilité environnementale. L'ensemble des résultats obtenus confirme que le système proposé répond aux exigences techniques, énergétiques et agronomiques identifiées dans la littérature récente, tout en apportant une application concrète adaptée au contexte ivoirien. Ce modèle peut constituer une base pour la conception de systèmes d'irrigation intelligents, intégrant des algorithmes de régulation prédictive et des capteurs, afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité agricole. Ce système, modélisé à l'aide d'outils numériques tels que PVsyst et Matlab, offre des avantages significatifs par rapport aux systèmes classiques utilisant un groupe électrogène et sans capteur d'humidité. Les résultats reposent sur une modélisation numérique. Une validation expérimentale sur site constitue une perspective pour confirmer les performances réelles du système.

Références

- [1] - JEET RAJ, DHIRAJ KHALKHO, M. P. TRIPATHI and YATNESH BISEN, "Optimizing Water Use for Okra Cultivation: A Soil Moisture Sensor-Based Approach", *Journal of Scientific Research and Reports*, 30 (4) (2024) 153 - 161. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2024/v30i41900>
- [2] - SALMAN HABIB, HAOMING LIU, MUHAMMAD TAMOOR, MUHAMMAD ANS ZAKA, YOUWEI JIA, ABDELAZIM G. HUSSEIN, HOSSAM M. ZAWBAA and SALAH KAMEL, "Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact", *Heliyon*, 9 (2023) 1 - 24. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16105>
- [3] - J. D. OWUSU-SEKYERE, L. K. SAM-AMOAH, E. TEYE and B. P. OSEI, "Crop coefficient (Kc), Water requirement and the effect of deficit irrigation on tomato in the coastal savannah zone of ghana", *International Journal of Science and nature*, 3 (1) (2012) 83 - 87
- [4] - R. R. RUKMOWATI BROTOJOJO, OKTAVIA S. PADMIN and AWANG H. PRATOMO, "Growth, Yield And Quality Of Tomato Cultivated Under Various Fertilizers And Soil Moisture Levels", *Natural Volatiles and Essentials oils*, 8 (4) (2021) 9747 - 9756
- [5] - GE LI, HUAIYU LONG, RENLIAN ZHANG, PATRICK J. DROHAN, AIGUO XU and LI NIU, "Stable Soil Moisture alleviates water Stress and Improves Morphogenesis of Tomato Seedlings", *Horticulturae*, 9 (391) (2023) 2 - 19. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030391>
- [6] - NEGASH, TATEK WONDIMU, TEFERA, ABERA TESFAYE, ASHEMI BIKILA, GEBEYEHU, TEZERA BIZUNEH, KETEMA, AWULACHEW, TIGIST WORKU and al., "Determination of Evapotranspiration and Crop Coefficient for Tomato by Using Non-Weighing Lysimeter in Semiarid Region", *Air sol and water research*, 17 (1) (2025) 1 - 8. <https://doi.org/10.1177/11786221241291313>
- [7] - FONDIO LASSINA, N'GBESSO MAKPO FRANCOIS DE PAUL, DJIDI ANDRE HORTENSE et COULIBALY NIAKARIA NOUPE, "Bien cultiver la tomate en Côte d'Ivoire, fiche technique tomate" CNRA, N°1 (2019)
- [8] - ALI O. M. MAKU, MUBBASHAR MEHMOOD and TARIQ NAWAZ CHAUDHARY, "Design, simulation and performance analysis of photovoltaic solar water pumping system", *Energy Harvesting and Systems*, 10 (2) (2023) 287 - 299. <https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0040>
- [9] - S. S. CHANDEL, M. NAGARAJU NAIK et R. CHANDEL, "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 49 (9) (2015) 1084 - 1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- [10] - RICHA PARMAR, DR. CHANDAN BANERJEE and DR. ARUN K. TRIPATHI, "Performance Analysis of Cost Effective Portable Solar Photovoltaic Water Pumping System", *Current Photovoltaic Research*, 9 (2) (2021) 51 - 58. <https://doi.org/10.21218/CPR.2021.9.2.051>

- [11] - S. ASHOKKUMAR, "Solar Water Pumping System for Agriculture", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (3) (2020) 2964 - 2967. <https://doi.org/10.35940/ijitee.C9201.019320>
- [12] - BANCHA SREEWIROTE, AKERATANA NOPPAKANT and CHAICHAN POTHISARN, "Performance and Economic Analysis of Solar Water Pump System", *International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering*, Maroc, (2017). <https://doi.org/10.1109/ICSREE.2017.7951514>
- [13] - M. A. HOSSAIN, M. S. HASSAN, M. A. MOTTALIB and al., "Feasibility of Solar Pump for Sustainable Irrigation in Bangladesh", *International Journal of Energy and Environment Engineering*, 6 (2015) 147 - 155. <https://doi.org/10.1007/s40095-015-0162-4>
- [14] - MOUSSA DOSSO, ALEXIS KOFFI, INNOCENT GLOU BI, ADAMA TRAORE et ANGEL AVADI, "Analyse fonctionnelle de la filière maraîchère périurbaine en Côte d'Ivoire (2021-2022)", Rapport du WP2 - Diagnostique et évaluation du projet MARIGO, (2023) 147 p.
- [15] - JIMMY ROYER, THOMAS DJIAKO, ERIC SCHILLER, BOCAR SADA SY et ERIC SCHILLER, "Le pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", Éditions multimondes, (1998) 281 p.
- [16] - AHMED ISSOUFOU IMADAN, GUY CLARENCE SEMASSOU, HAMIDOU AROUNA SALEY, LAWAN SANI et IBRAHIM DOUDOU BOUKARY, "Dimensionnement et conception d'un système de pompage solaire PV pour le maraichage à ANERSOL au Niger", *Afrique SCIENCE*, 24 (2) (2024) 108 - 121
- [17] - GOLINA SAMIR ADLY, WAGDY R. ANIS, PETER H. S. RIAD, MINA S. F. SAMAAAN, ELSAYED R. SAADANY and SAMEH O. ABDELLATIF, "Techno-economic study for photovoltaic battery-free irrigation systems in an arid area for olive fields in Western West Al Minya, Egypt", *Discover Sustainability*, 5 (366) (2024) 1 - 15. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00566-y>
- [18] - R. G. ALLEN, L. S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56", FAO, Rome, (1998)
- [19] - ABDUL RASYID SIDIK, AKBAR TAWAKAL, GUMILAR SURYA SUMIRAT and PANJI NARPUTRO, "Smart Irrigation Based on Soil Moisture Sensors with Photovoltaic Energy", *Engineering Proceedings*, 107 (17) (2025) 1 - 10. <https://doi.org/10.3390/engproc2025107017>
- [20] - ABDUL-RAHIM BAWA, ALBERT KOJO SUNNU and EMMANUEL AKONO SARSAH, "Recent Advances in Solar-powered Photovoltaic Pumping Systems for Drip Irrigation", *IRASD Journal of Energy & Environment*, 4 (2) (2023) 112 - 132. <https://doi.org/10.52131/jee.2023.0402.0040>